

## **4 Análise do sistema de medição**

Neste capítulo são apresentados resultados de testes de bancada, de inspeções de campo, de análise dinâmica e estática do sistema utilizado pelo Pig Palito. Nos tópicos seguintes são mostradas as limitações práticas, características básicas do sistema de medição, e trabalho experimental com sensores palito. Nesta parte experimental, são demonstrados os resultados dos testes de perfilagem geométrica e dinâmica de medição (vibrações) do sensor palito.

### **4.1**

#### **Limitações do sistema de medição**

Uma das principais limitações do Pig Palito é sua dificuldade em detectar defeitos profundos com pequenas dimensões de contorno, pois o palito não consegue atingir geometricamente o fundo dos mesmos. Isto acontece devido ao ângulo de ataque do sensor palito. O critério utilizado no projeto mecânico do sensor é determinar que no diâmetro nominal interno do duto a inspecionar, o palito deverá formar um ângulo de 45 graus com a superfície. A ilustração na Figura 26 mostra uma simulação de perfilagem geométrica limitada pelo ângulo de ataque do sensor.

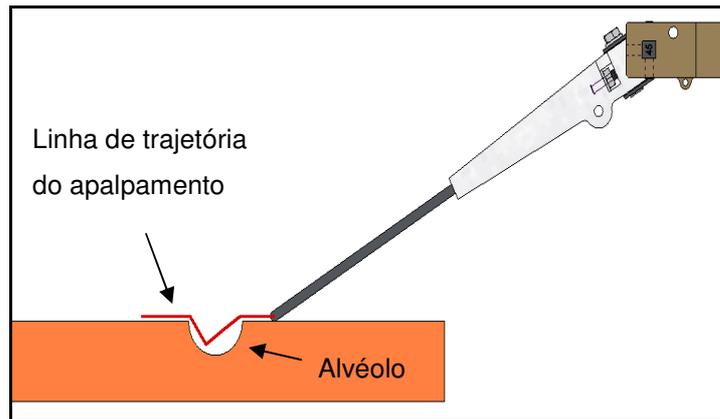


Figura 26 - Simulação do sensor palito apalpando alvéolo

A estrutura de montagem dos sensores palito não permite que a inspeção seja bi-direcional, portanto o equipamento precisa ser lançado de um ponto da tubulação e recebido num ponto final diferente do ponto de partida. Esta característica de inspeção pode ser uma limitação, porque existem dutos de perfuração e escoamento de poços de produção que possuem um único ponto de acesso ao equipamento.

Conforme explicado anteriormente, o Pig Palito não detecta defeitos de corrosão externa. Entretanto, em dutos *offshore*, isto não se torne uma característica negativa devido à existência de outros meios eficazes no controle da corrosão externa.

Quando a concentração de parafina é intensa e as condições de limpeza no duto são precárias, o sensor palito pode não medir a corrosão interna. Assim, eventuais defeitos podem ser cobertos por depósitos de detritos carregados pelo fluido. No entanto, as condições de limpeza para inspeção com Pig Palito são similares àquelas necessárias na inspeção com pigs instrumentados convencionais, e não representam uma dificuldade notória. Em geral, é recomendada uma rotina diária de uso de pigs de limpeza por alguns dias até o lançamento do Pig Palito.

Em alguns casos o Pig Palito pode não ficar perfeitamente centralizado dentro do duto. Isto ocorre por causa do peso da ferramenta e mau dimensionamento da sustentação do pig (copos e rodízios). Assim, os copos de poliuretano deformam acentuadamente na geratriz inferior (6h) da ferramenta e produz uma falsa constatação de duto oval. Entretanto, isto pode ser minimizado ou eliminado com técnicas de tratamento e análise de dados.

A vibração do palito causada pelo impacto na superfície do duto é uma deficiência do sistema de medição. Esta condição geralmente ocorre após passagem da ferramenta em soldas circunferenciais durante inspeção. Isto gera uma oscilação ou “overshoot” no sinal de medida do sensor e provoca falsas interpretações de medição, como uma falsa corrosão, que podem ser significativas dependendo da espessura do duto e velocidade da ferramenta naquele momento.

#### 4.1.1

##### Testes de Bancada

Os testes realizados na bancada têm objetivo de analisar as principais limitações citadas no tópico anterior. O sistema de medição do Pig Palito foi montado numa bancada instrumentada com disco giratório (Figura 27). A fim de simular as condições de inspeção e caracterizar a medição dos sensores palito, o disco foi manufacturado com defeitos alveolares e um cordão de solda.

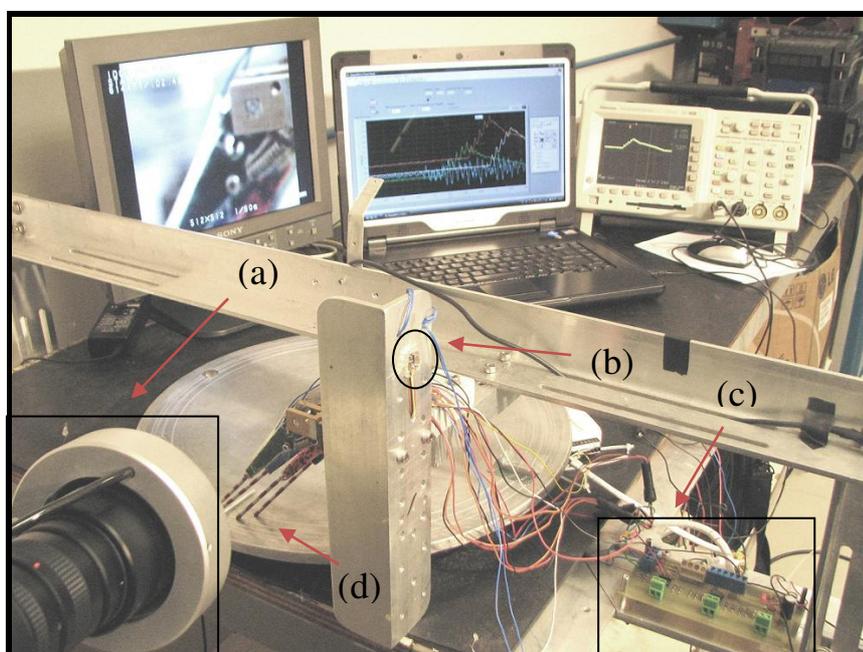


Figura 27 - Bancada instrumentada. Câmera de alta velocidade (a). Acelerômetro da mesa (b). Placa de condicionamento de sinais (c). Sensores palito (d)

O primeiro teste visou caracterizar e quantificar a medição de micro-geometria do sensor palito. A metodologia do teste foi montar uma estrutura com sensores palito sobre um disco com defeitos em formato de alvéolo (Figura 28), e posteriormente analisar dados gerados pelo apalpamento. Durante os testes, a velocidade do disco foi controlada e os sensores tiveram o espaçamento fixado em cinco milímetros entre os mesmos (valor típico de resolução radial do Pig Palito). A calibração dos sensores utilizou o mesmo método de calibração do pig, mas neste caso o gabarito de calibração foi fresado no próprio disco. Nesta análise os defeitos medidos pelos sensores foram comparados com sua geometria real no disco.

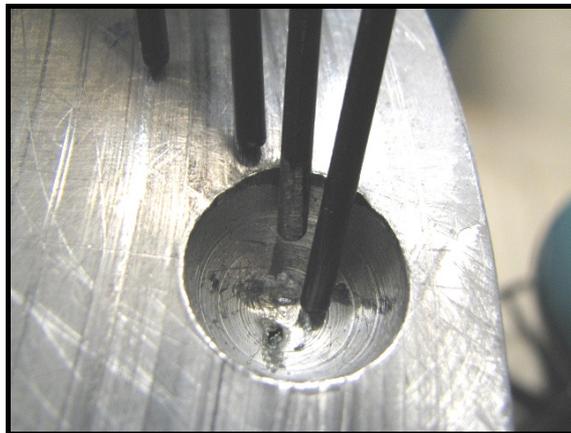


Figura 28 - Foto dos sensores palito durante a perfilagem no disco com alvéolos

No teste foi utilizada uma placa analógico-digital da *National Instruments (NI)* de 14 bits, com uma taxa de amostragem de 10 kHz por canal. O sistema de medição foi constituído de uma interface em *Labview (NI)* para configuração de parâmetros de aquisição, controle e visualização dos dados coletados. A instrumentação da bancada contava com um *encoder* para medição de velocidade angular, acelerômetro, placa de condicionamento de sinais de extensômetros e uma câmera de alta velocidade. A velocidade de rotação do disco era controlada pelo ajuste de nível de tensão no motor de corrente contínua que estava acoplado ao eixo de giro do mesmo. A velocidade tangencial no centro dos alvéolos foi de 200 mm/s.

As incertezas de medida no ensaio com o disco de prova foram o ruído elétrico do sistema de aquisição e medição de distância percorrida pelos sensores palito. Estas incertezas foram estimadas a partir de medidas e correlações com os dados adquiridos durante os ensaios. Os dados, do sinal dos sensores *Hall*, adquiridos pelo sistema foram filtrados através da aplicação de um filtro digital de resposta ao impulso finita (FIR) no *Matlab* para possuir o mesmo espectro de frequências dos sinais adquiridos pela eletrônica embarcada do Pig Palito. A Figura 29 mostra a resposta em módulo e frequência deste filtro digital passa-baixa do tipo “*equiripple*” com ordem 35 obtida pelo “*Filter Design Toolbox*” do *Matlab*. O filtro digital tinha frequência de corte (3dB) de 250 Hz.

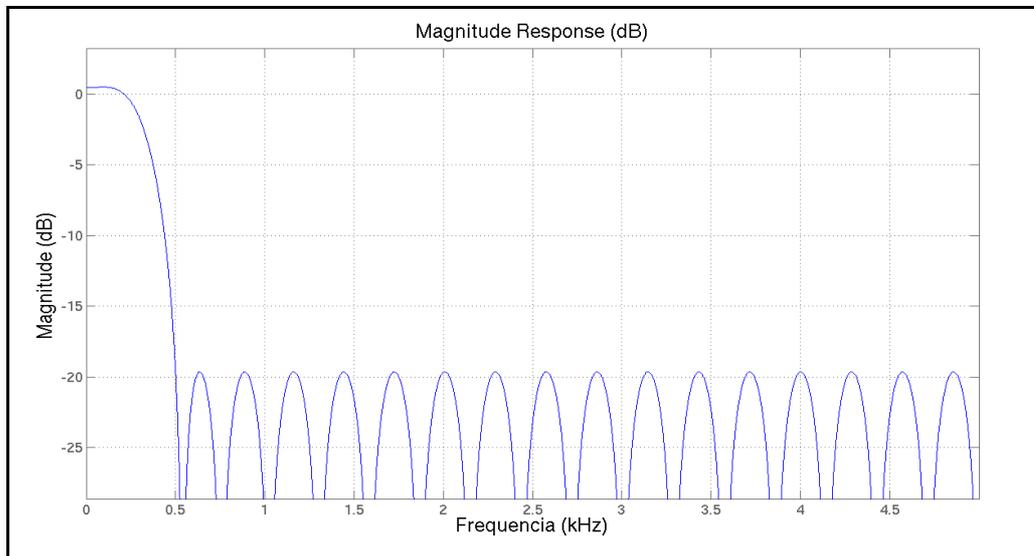


Figura 29 - Curva de resposta em frequência do filtro digital aplicado ao sensor *Hall*

Os histogramas da Figura 30-32 mostram as repetições de medição, numa aquisição de 1000 amostras digitalizadas pelo sistema, do ruído elétrico de cada sensor palito. Estas medidas foram feitas com o disco de defeitos estático e os sensores palito devidamente energizados. A Tabela 2 complementa as estimativas dos histogramas apresentando os respectivos desvios padrões e médias da amplitude do sinal de saída de cada sensor palito, que foram calculadas a partir dos recursos computacionais (*std*, *mean*) do *Matlab*.

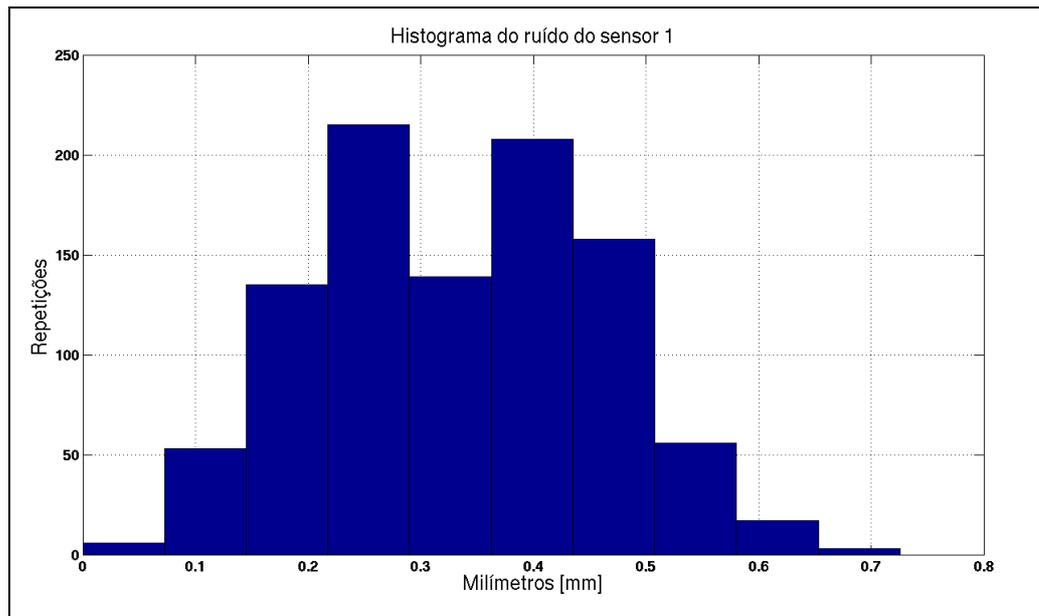


Figura 30 - Histograma do ruído elétrico medido no sensor palito 1

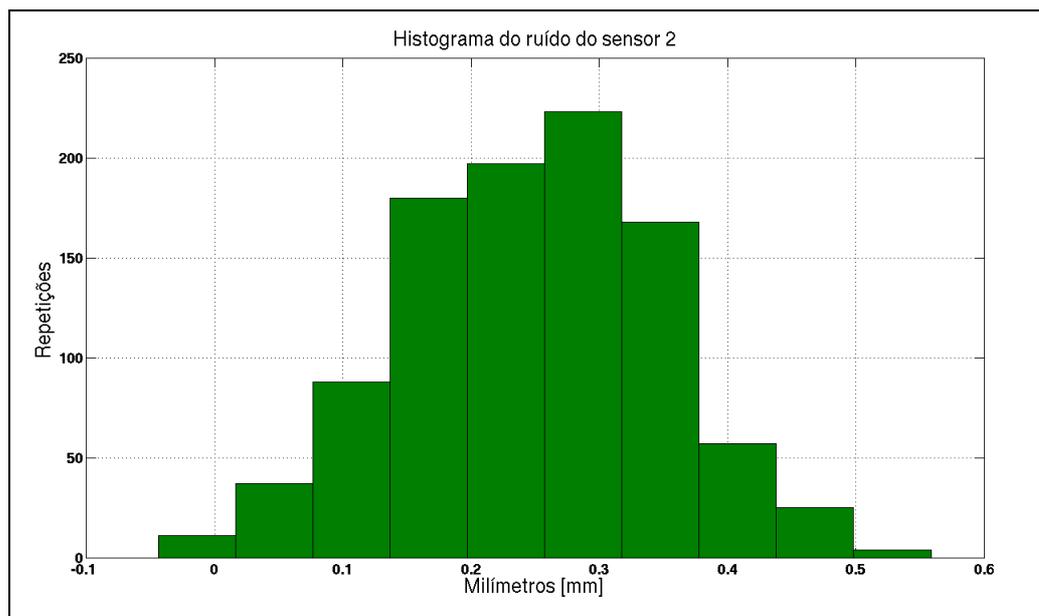


Figura 31 – Histograma do ruído elétrico medido no sensor palito 2

Sensor Palito	Média de ruído [mm]	Desvio padrão [mm]
Sensor 1	0.33	0.12
Sensor 2	0.25	0.10
Sensor 3	0.29	0.12

Tabela 2 – Tabela de médias e desvios padrões do ruído elétrico de cada sensor palito

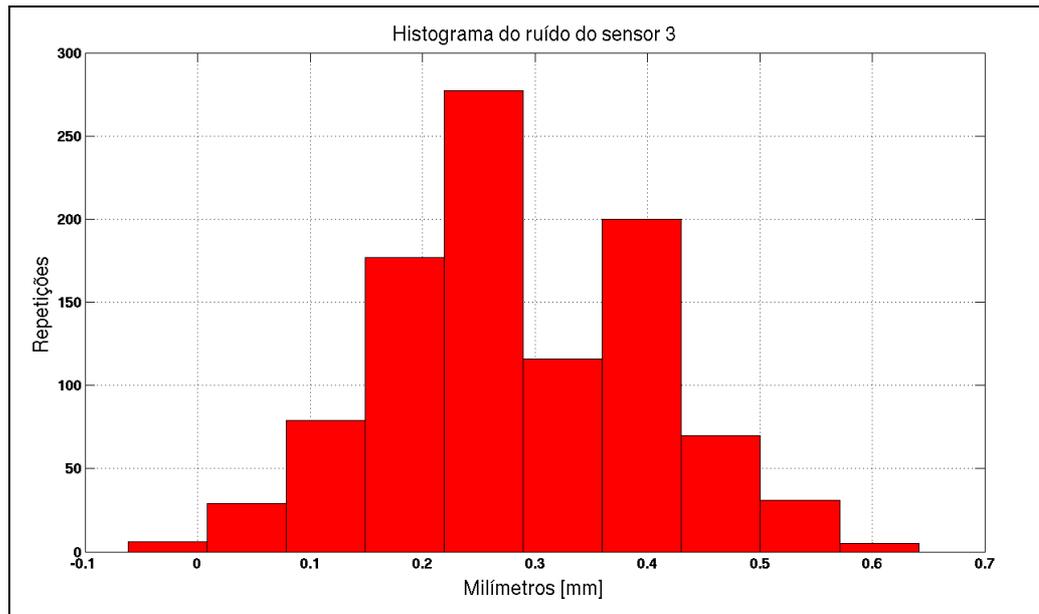


Figura 32 – Histograma do ruído medido no sensor palito 3

Notaram-se ovalizações, moosas e deformações ao redor dos defeitos manufaturados, que foram causados pelo processo manual de fabricação dos mesmos no disco de prova. Nos histogramas 33-35 e na Tabela 2 foi observado um *offset* (“Média de ruído” - Tabela 2) das medidas do sinal dos sensores palito. Assim, as incertezas de medição do ensaio, de cada canal de sensor palito, são os *offsets* e desvios padrões das medidas de ruído elétrico de cada sensor palito.

À distância percorrida pelo sensor palito foi determinada a partir da taxa de amostragem do sistema (10 kHz) e a velocidade tangencial ( $V = \omega \cdot R$ ) no ponto de medida do palito intermediário.

O primeiro sensor palito estava posicionado no raio mais externo em relação aos demais sensores, portanto o sensor dois tem raio de medida 5 mm menor que o primeiro e o sensor três tem menos 10 mm. O sensor palito dois (sensor palito central) foi escolhido como sensor de referência, por causa de seu raio de medição ( $R_2$ ) estar posicionado no centro dos alvéolos (defeitos manufaturados). Então, conforme raciocínio mostrado na Tabela 3 corrigiu-se a cada batelada de aquisição ou medição (Figuras 37-41) à distância percorrida dos palitos adjacentes ao palito central pela razão dos seus raios correspondentes. A velocidade tangencial de 200 mm/s correspondia a 0,02mm de distância percorrida pelo sensor palito entre cada amostra adquirida. Portanto, de acordo com Tabela 3, a incerteza da medida de distância nos ensaios de medição era de

$\pm 12\%$  da distância medida em cada batelada de aquisição. Isto, por exemplo, representa na maior batelada de aquisição de 25 mm (Figura 37), uma incerteza na medida de distância de 3 mm.

- 1)  $R_1 > R_2 > R_3$  (raios de medida dos sensores palito no disco de prova)
- 2)  $V = \omega_n \cdot R_n$ ;  $V = \Delta S_n / \Delta t$  (velocidade tangencial)
- 3)  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$  (velocidade angular)
- 4)  $\Delta S_1 / R_1 = \Delta S_2 / R_2 = \dots = \Delta S_n / R_n$  então  $\Delta S_n / \Delta S_{n+1} = R_n / R_{n+1}$  (razão entre arcos de distâncias percorridas e raios)
- 5)  $\Delta S_n = (\Delta S_{n+1}) \cdot (R_n / R_{n+1})$ , como  $R_2 / R_3$  é  $180\text{mm} / 175\text{mm} = 1.29$ ,  $\Delta S_2 = \Delta S_3 \cdot 1.29$  (raio externo percorre 29% a mais de medida que raio interno adjacente)
- 6) A distância entre cada amostra aquisitada ( $dS_n$ ) é o tempo de amostragem vezes a velocidade do disco de defeitos.  $dS_n = (1 / 10 \text{ kHz}) \cdot (200 \text{ mm/s}) = 0.02 \text{ mm}$ .
- 7) Se  $dS_n = 0.02 \text{ mm}$ , então incerteza de medida de distância é  $(dS_n / (dS_n + 29\% \cdot dS_n) / 2) = \pm 12\%$ .

Tabela 3 – Tabela de equações de distância do sensor em função de sua aquisição

O gabarito de calibração tipo “escada” fresado no disco possuía degraus com dois milímetros de largura e profundidade. Aplicou-se o método dos mínimos quadrados (*lsqcurvefit*) do *Matlab* para conversão dos dados em unidades de volts para medida em milímetros (processo de calibração). A superfície da “escada”, fresada no disco, foi perfilada pelos três sensores palito e teve seus dados calibrados e depois plotados conforme mostrado na Figura 33. Esta figura tri-dimensional ilustra as curvas dos três sensores posicionados em planos que cortam o eixo x em 0, 5 e 10 mm, onde suas superfícies adjacentes foram formadas a partir da interpolação de pontos entre as curvas do sinal de cada sensor por um recurso de plotagem do *Matlab*.

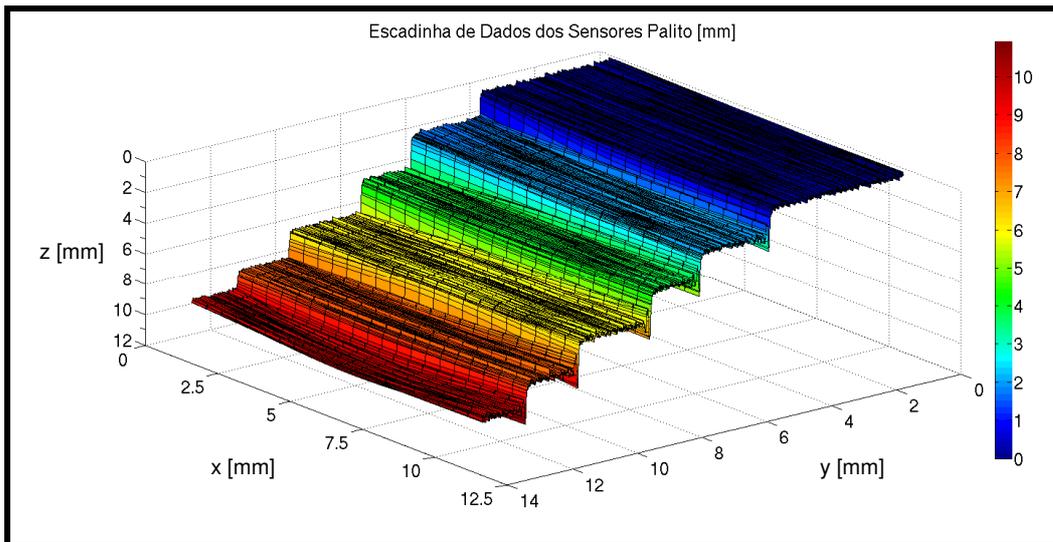


Figura 33 - Escadinha de calibração (3D) de dados dos sensores palito no disco

Algumas folgas do sistema mecânico de rotação do disco foram detectadas posteriormente, como o empenamento do eixo de rotação do disco de prova e o espaçamento de 6 mm do segundo para o terceiro sensor palito ao invés de 5 mm. Os alvéolos manufaturadas no disco de prova tinham diâmetros de 5, 9, 12, 16 e 20 mm com as respectivas profundidades de 2.5, 4.5, 6, 8, 10 mm. Os gráficos dos sinais de cada sensor palito durante a perfilagem dos alvéolos são mostrados nas Figuras 34-38. Os sensores palito um, dois e três são representados respectivamente pelas curvas de cor azul, verde e vermelho.

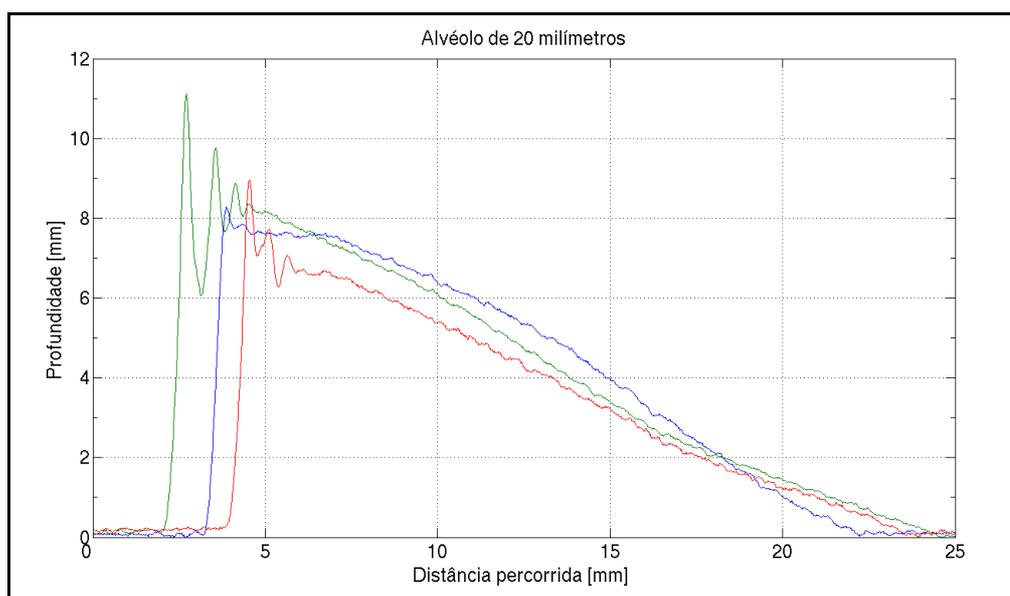


Figura 34 - Sensores palito medindo alvéolo de 20x10 mm (DxP)

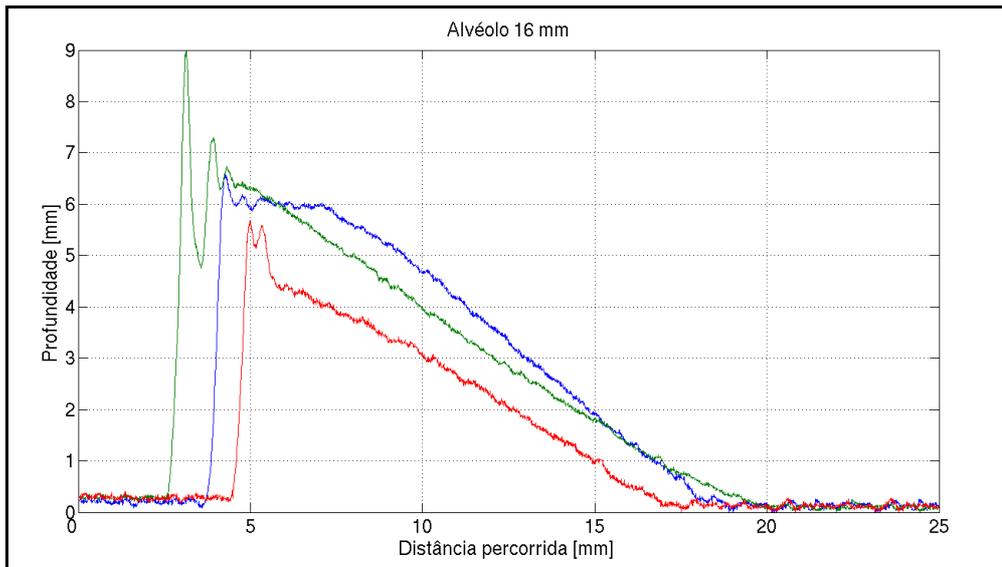


Figura 35 - Sensores palito medindo alvéolo de 16x8 mm (DxP)

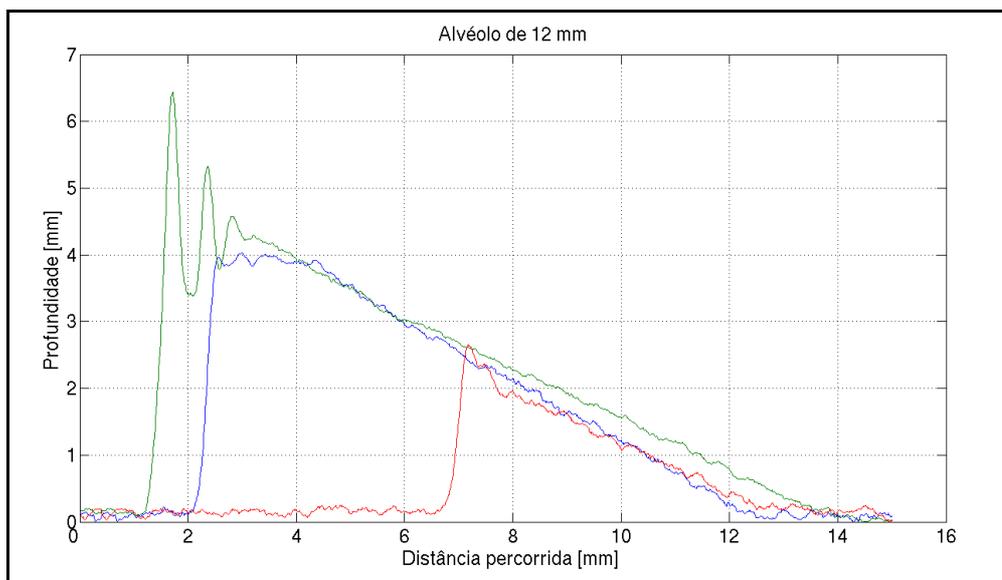


Figura 36 - Sensores palito medindo alvéolo de 12x6 mm (DxP)

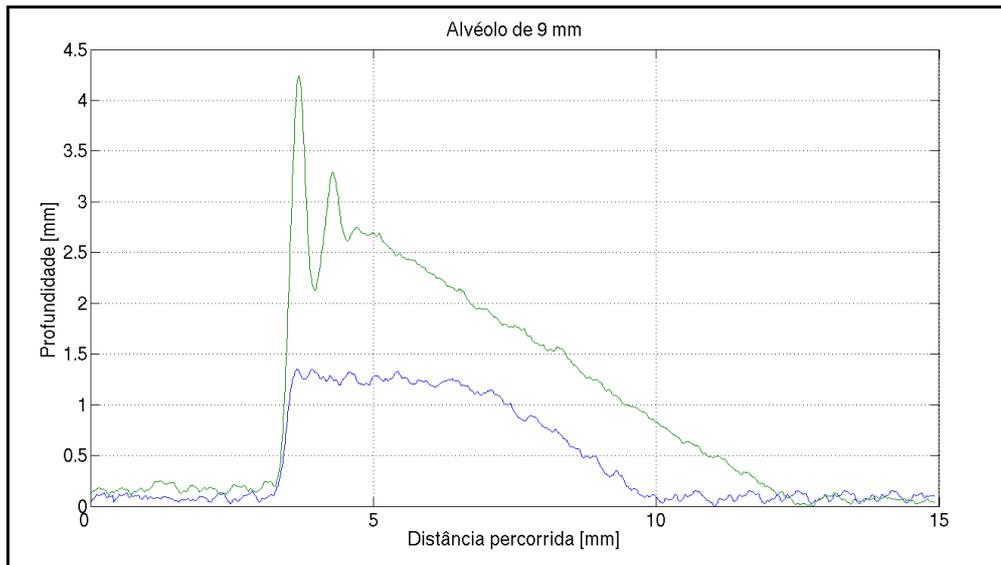


Figura 37 - Sensores palito medindo alvéolo de 9 x 4.5 mm (DxP)

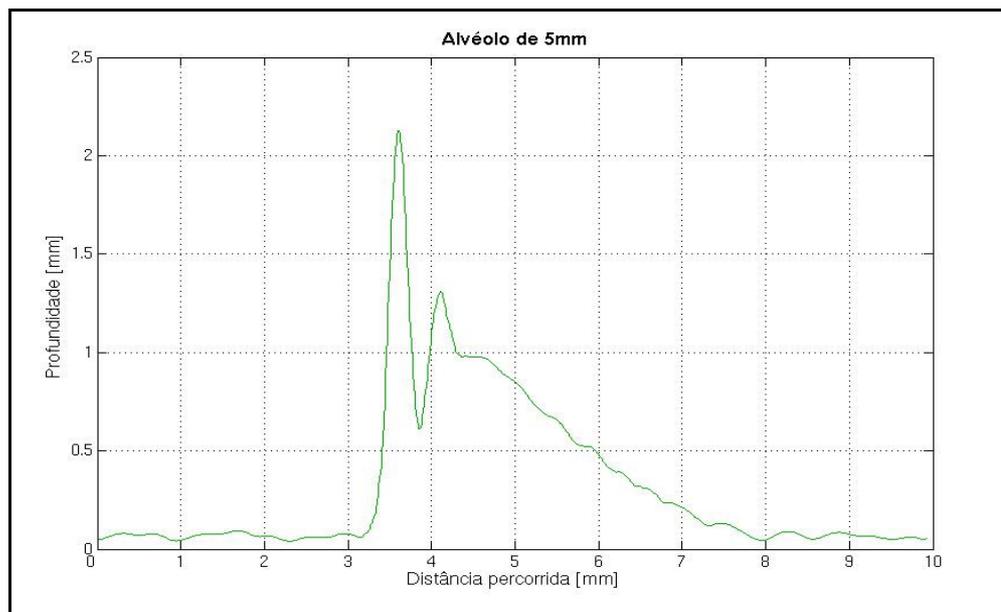


Figura 38 - Sensor palito (2) medindo alvéolo de 5 x 2.5 mm (DxP)

Conforme os gráficos, o sensor palito central não conseguiu atingir o fundo de todos os defeitos apalpadados. Entretanto, isto já era esperado, devido ao ângulo de ataque do sensor não permitir atingir o fundo dos alvéolos de 5, 9 e 12 mm de diâmetro. A força da mola do sensor e a inércia rotativa da haste também influenciaram as medidas das dimensões alveolares. As Tabelas 4 e 5 apresentam as profundidades dos alvéolos e os resultados medidos neste ensaio.

Resumo de medidas de alvéolos no disco de prova (d x p)* [mm]			
Alvéolo	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
5 x 2.5	-	4.5 x 1.2	-
9 x 4.5	7 x 1.2	9 x 2.7	-
12 x 6	10 x 4	12 x 4.5	5 x 2.5
16 x 8	14 x 6	16 x 6.5	12 x 4
20 x 10	19 x 7.5	20 x 8.2	18 x 6.5

Tabela 4 – Resumo de medidas de alvéolos no disco de prova

(\*) (d x p) – Diâmetro versus profundidade

(\*) Foram desconsiderados para efeitos de medida os picos de *overshoot* do sinal.

Profundidade efetiva de medição* do versus medida do sensor palito central		
Profundidade efetiva [mm]	Sensor Central [mm]	Erro de medida
2	1.2	40%
4.2	2.7	34%
5.8	4.5	22%
7.8	6.5	17%
10	8.2	18%

Tabela 5 - Profundidade efetiva de medição versus medida do sensor palito central

(\*) Dimensão de alvéolo geometricamente possível de medir com o sensor palito

A deficiência de medição causada pelo ângulo de ataque do sensor palito é exemplificada na Figura 39 em alvéolo de 4.5 mm de profundidade. Isto demonstra a limitação geométrica e profundidade efetiva de medida, neste caso de 4.2 mm, na perfilagem de crateras ou defeitos com diâmetros muito menores que suas profundidades.

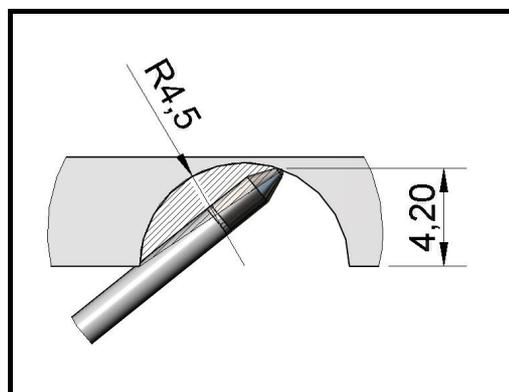


Figura 39 – Ilustração da profundidade alcançada pelo sensor palito em alvéolo

O segundo teste no disco de prova teve por objetivo analisar o “overshoot” do sinal do sensor palito, em função da sua cinemática e dinâmica de medição durante a perfilagem da solda manufaturada no disco. A bancada e o sensor palito foram instrumentados com extensômetros para medir deformações durante flexão da haste, acelerômetros e uma câmera fotográfica digital de alta velocidade. A solda manufaturada no disco tinha 3.5 mm de altura e 6 mm de largura, semelhante a uma solda real entre tubos (Figura 40). O efeito de “overshoot” causado pela colisão elástica do palito teve suas frequências de vibração analisadas durante os ensaios.

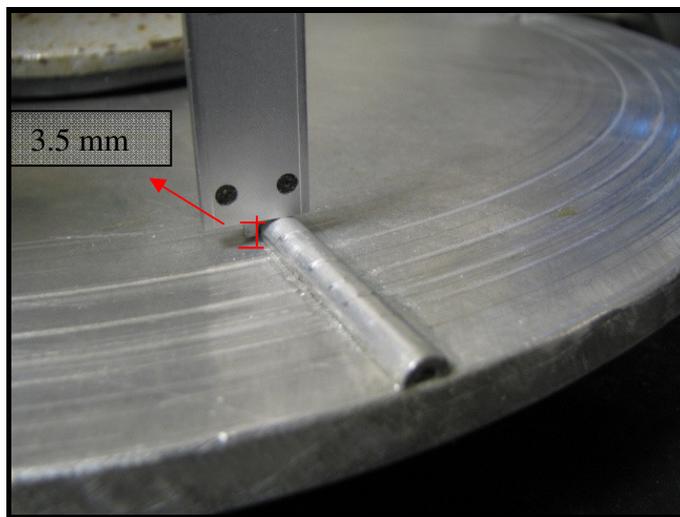


Figura 40 - Solda manufaturada no disco de prova

O estudo de vibrações da haste do sensor palito foi realizado através do *software Cosmos da SolidWorks* e ajudou na comprovação dos resultados de campo na bancada. As duas configurações simuladas na análise modal foram: A haste do sensor palito engastada no eixo de rotação (base) e outra extremidade livre, e com a haste do sensor engastada nas duas extremidades (bi-engastado). O relatório da análise modal do software é realizado através da aplicação de elementos finitos em uma estrutura mecânica modelada pelo usuário. É preciso especificar cada tipo de material utilizado e suas propriedades físicas. A “excitação” mecânica feita pelo programa nesta análise modal é semelhante a uma colisão inelástica do palito, que na prática funciona como um diapasão. A análise modal é simplesmente a resposta impulsional do sistema mecânico do conjunto do palito. A Figura 41 apresenta o segundo modo de vibração do palito com as duas

extremidades engastadas. O primeiro modo, que não é mostrado aqui, corresponde a uma vibração fora do plano de medição ou detecção do sensor *Hall*.



Figura 41 - Palito (2º modo de vibração) com malha de elementos finitos

A Figura 42 ilustra os quatro primeiros modos de vibração do sensor modelado com as duas extremidades engastadas. Neste caso, o primeiro e terceiro modos correspondem a vibrações fora do plano de medição, portanto não são detectadas pelo sensor *Hall*. A Tabela 6 resume os principais modos de vibração encontrados nesta configuração.

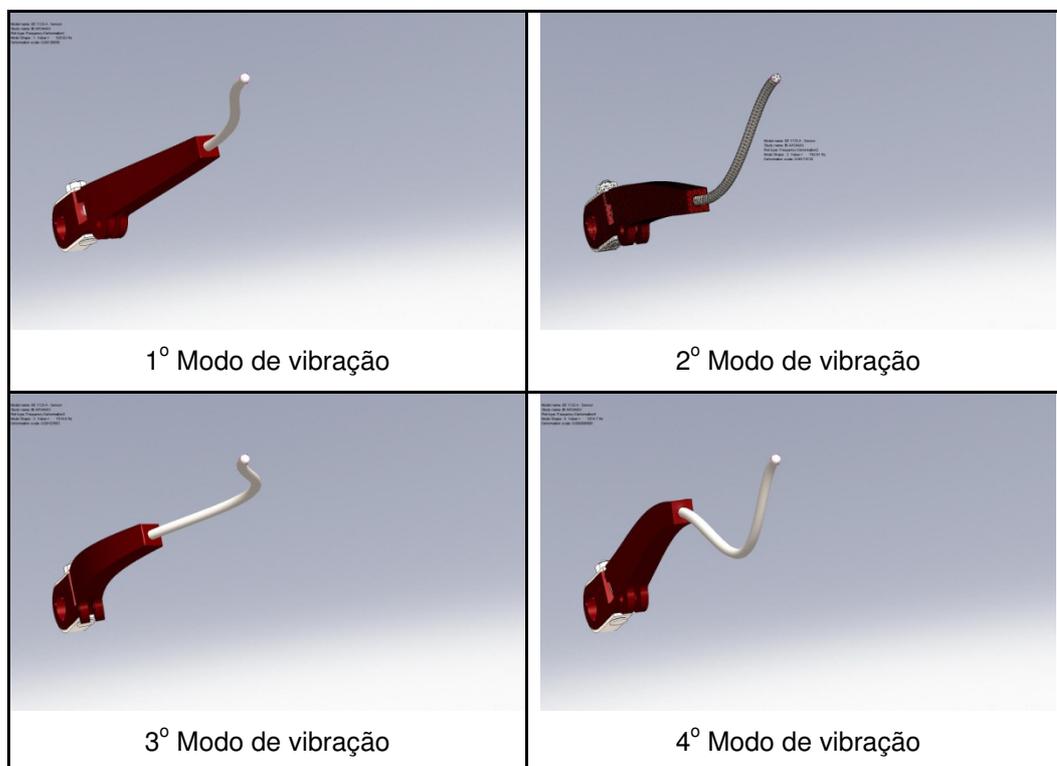


Figura 42 - Ilustração dos modos de vibração do palito (bi-engastado)

Modo de Vibração	Frequência (Hz)	Período (seg.)
1	525.82	0.0019018
2	<b>762.01</b>	0.0013123
3	1514.6	0.00066024
4	<b>1814.7</b>	0.00055105
5	2812.2	0.0003556
<b>Tipo de Elemento: Elemento Sólido</b>		
Dimensão do Elemento:	1.5928 mm	
Qualidade da Malha:	Alta	
Número de Elementos:	19223	
Número de Nós:	31271	

Tabela 6 - Modos de vibração do palito (bi-engastado) e características de malha

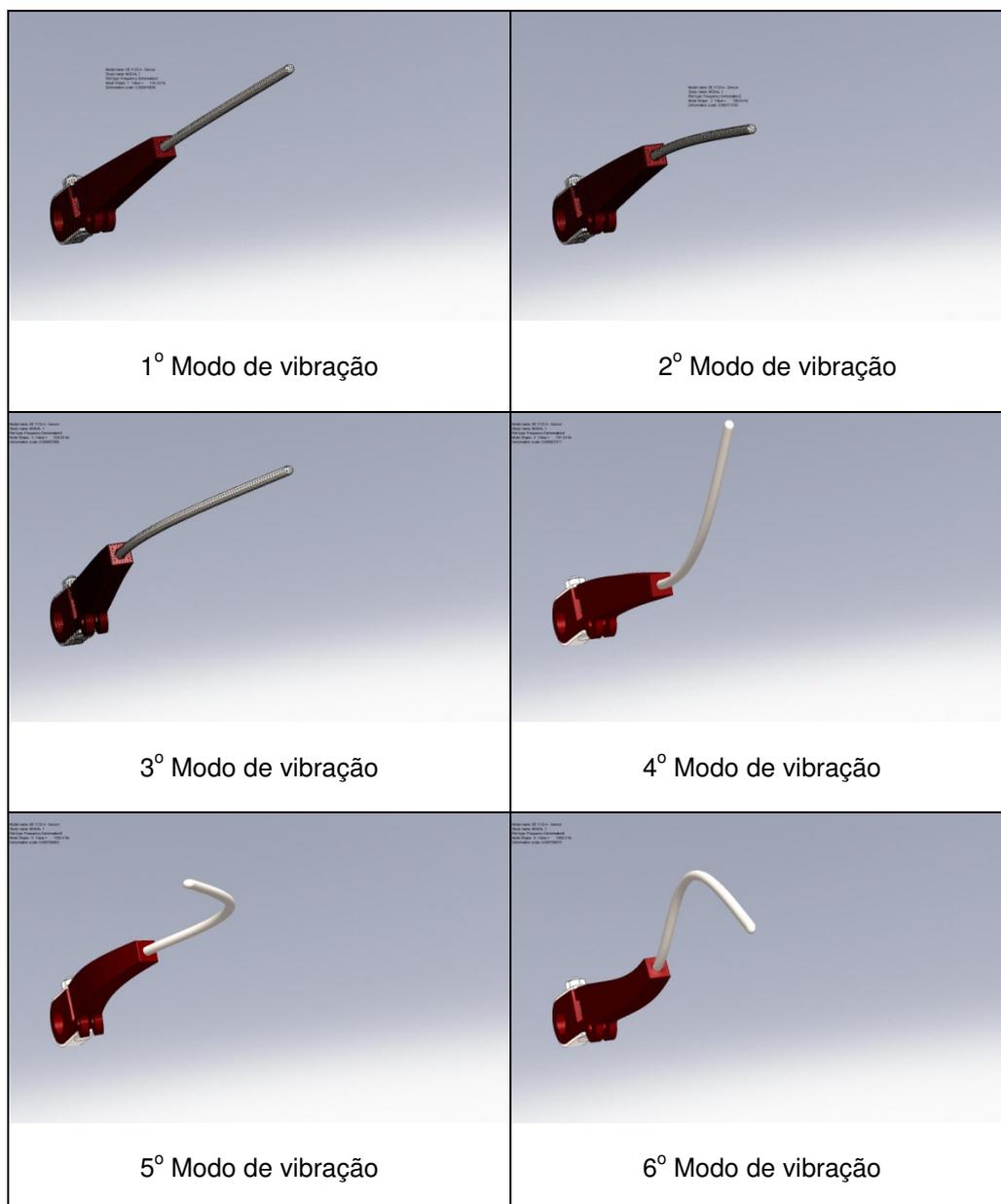


Figura 43 - Ilustração dos modos de vibração do palito (engastado na base)

Na Figura 43, os seis primeiros modos de vibração do sensor modelado com a extremidade à esquerda engastada e a outra livre são mostrados na ilustração anterior. A Tabela 7 abaixo resume principais modos de vibração encontrados nesta configuração.

Modo de Vibração	Frequência(Hz)	Período (seg.)
1	134.32	0.0074449
<b>2</b>	<b>189.04</b>	0.0052899
3	529.26	0.0018894
<b>4</b>	<b>747.24</b>	0.0013383
5	1502.4	0.00066562
<b>6</b>	<b>1800.3</b>	0.00055548
7	2806.7	0.0003563
<b>Tipo de Elemento: Elemento Sólido</b>		
Dimensão do Elemento:	0.98017 mm	
Qualidade da Malha:	Alta	
Número de Elementos:	64489	
Número de Nós:	98521	

Tabela 7 - Modos de vibração do palito (engastado na base) e características de malha

De acordo com os resultados da análise modal, caso o sensor palito entrasse em ressonância após impacto na superfície do duto, os modos de vibração par do palito teriam frequências de 189, 747 e 1800 Hz para haste engastada somente na base e para configuração bi-engastada (haste e ponta do palito) de 762 e 1815 Hz.

Na ressonância de modos de vibração par, o palito pode causar erros de interpretação de medida por estarem no plano vertical de medição do sensor *Hall*, uma vez que este sensor deve indicar ou medir qualquer movimento da haste neste plano. Como os modos de vibração ímpar têm direção e sentido lateral de movimentação (plano horizontal) a medição do sensor *Hall* dentro do palito não é afetada.

A seguir são mostrados os resultados dos ensaios de medição com o sensor palito no disco com solda manufaturada de defeitos. A instrumentação do sensor palito com acelerômetro e extensômetro também ajudou a determinar, além do sinal do próprio sensor *Hall*, os modos de vibração par do sistema mecânico. Nestes ensaios foram utilizados intercaladamente três sensores palito numa mesma base de fixação que estava presa na estrutura rígida da bancada instrumentada do disco rotativo. A taxa de amostragem utilizada no ensaio pela placa de aquisição de dados foi de 10 kHz. O gráfico da Figura 44 representa o

sinal de saída do sensor palito quando ele apalpa uma solda do disco de prova numa velocidade de 500 mm/s, que também mostra o sinal do extensômetro fixo na sua haste neste mesmo instante.

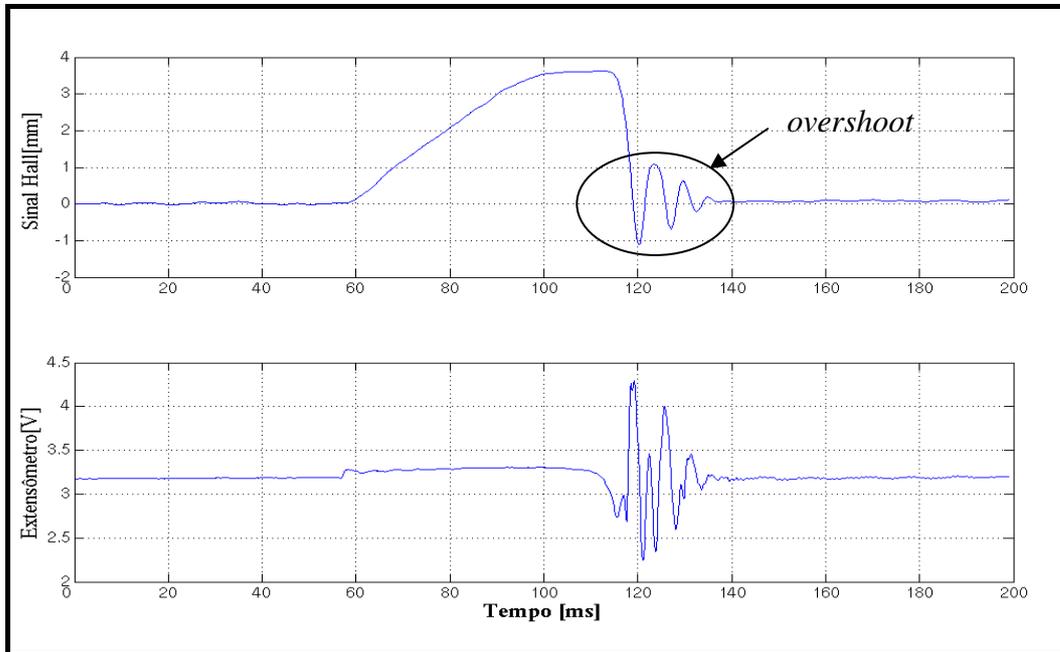


Figura 44 - Sinais dos transdutores *Hall* e extensômetro ao apalpar uma solda

A perda de energia no movimento do palito é devido ao atrito da haste do palito com a base e o eixo de rotação do sensor, portanto um movimento sobreamortecido. Este atrito é viscoso quando o Pig Palito está imerso no fluido de escoamento, como óleo, e portanto, numa inspeção de duto conduzindo líquido, o *overshoot* do sinal do sensor Hall deve ser menor do que o medido neste ensaio.

O *overshoot* detectado na figura acima ocorre quando o palito descola da superfície apalpada, acelera verticalmente e colide elasticamente com a superfície do disco. A flexão máxima do palito ocorre durante a primeira colisão e flexões posteriores acontecem com o palito no ar e colisão seguinte. Adicionando-se o sinal de um acelerômetro bi-axial [23] nesta análise, e extraindo a componente resultante dos dois eixos perpendiculares (x e y) e retirando o *offset* da aceleração gravitacional da terra, pode-se observar na Figura 49 a vibração do palito após impacto na superfície do disco. A Figura 45 mostra a configuração da instrumentação do palito com o uso dos transdutores de flexão e aceleração fixos no seu corpo.

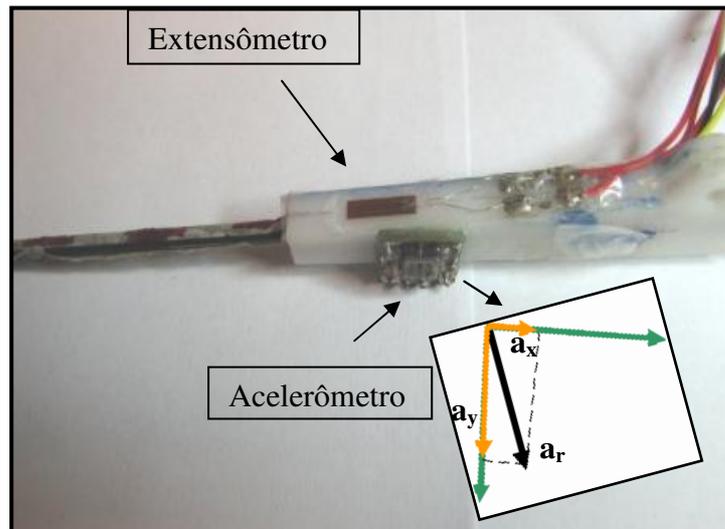


Figura 45 - Sensor Palito Instrumentado com extensômetro e acelerômetro

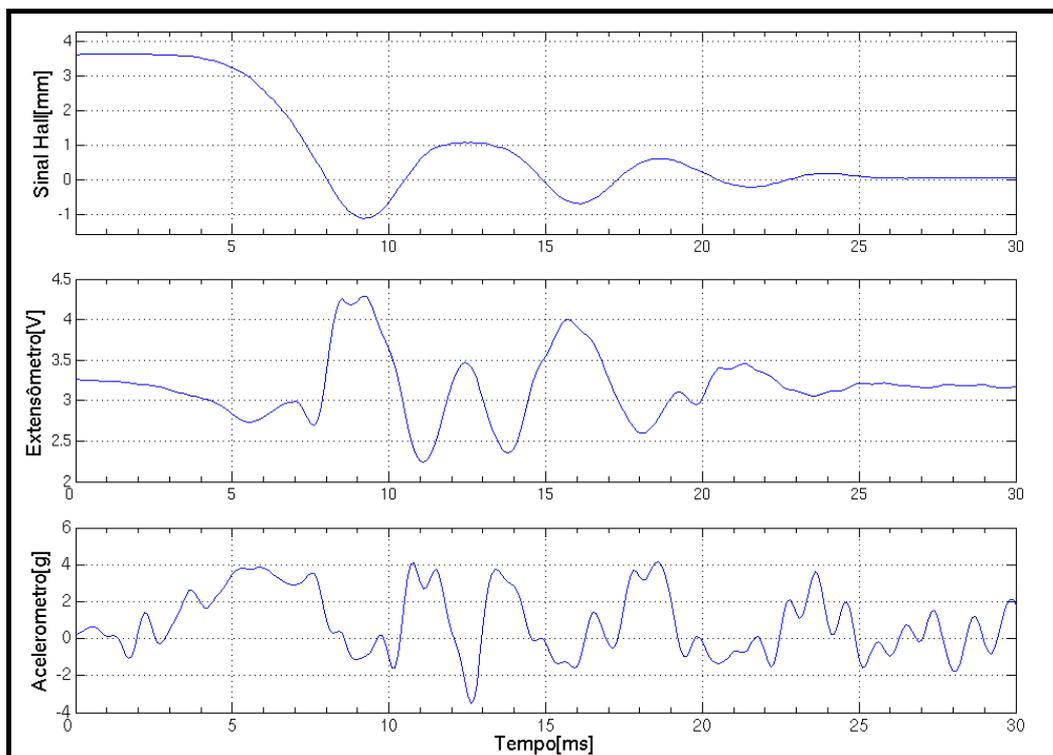


Figura 46 - Sinais de geometria, flexão e aceleração no palito na perfilagem da solda

A amplitude de pico do *overshoot* registrado pelo sensor *Hall* ficou em torno de  $\pm 1$  mm, isto numa velocidade tangencial de medida de 500 mm/s. Este *overshoot* do sinal saída do sensor palito pode ser significativo dependendo da espessura do duto, espessura da solda e velocidade do pig instrumentado tipo palito. A duração do transiente do sinal amostrado na Figura 46 ficou em torno de

16 ms, que representa 8 mm de medida “não confiável” ou passível de erro de interpretação na medição de perda/ganho de espessura no duto. É importante lembrar sobre a presença de corrosão interna em dutos, que são normalmente encontradas junto às soldas circunferenciais (transversais) na emenda de tubos [24 ], portanto a medição realizada pelo sensor palito após soldas transversais pode ser prejudicada pelo efeito de *overshoot* do sinal do *Hall*.

Antes de determinar o espectro de freqüências de vibração do sensor palito, foi medida a resposta impulsional da bancada instrumentada com o disco giratório. Esta resposta impulsional da bancada foi medida através do acelerômetro de mesa, fixado no suporte de sustentação dos sensores palito. A resposta foi gerada através de uma leve pancada de um martelo de aço. A banda de passagem dos acelerômetros utilizados nos ensaios foi de 1.2 kHz, e a análise do espectro de freqüências foi feita aplicando-se a transformada rápida de Fourier (*FFT*). A Figura 47 mostra o gráfico de energia normalizado, com freqüência nula de amplitude unitária, do espectro de freqüências do acelerômetro de mesa e seu respectivo sinal, em unidades de aceleração gravitacional, no domínio do tempo. A freqüência de ressonância da bancada instrumentada ou mesa encontrada foi de 62 Hz.

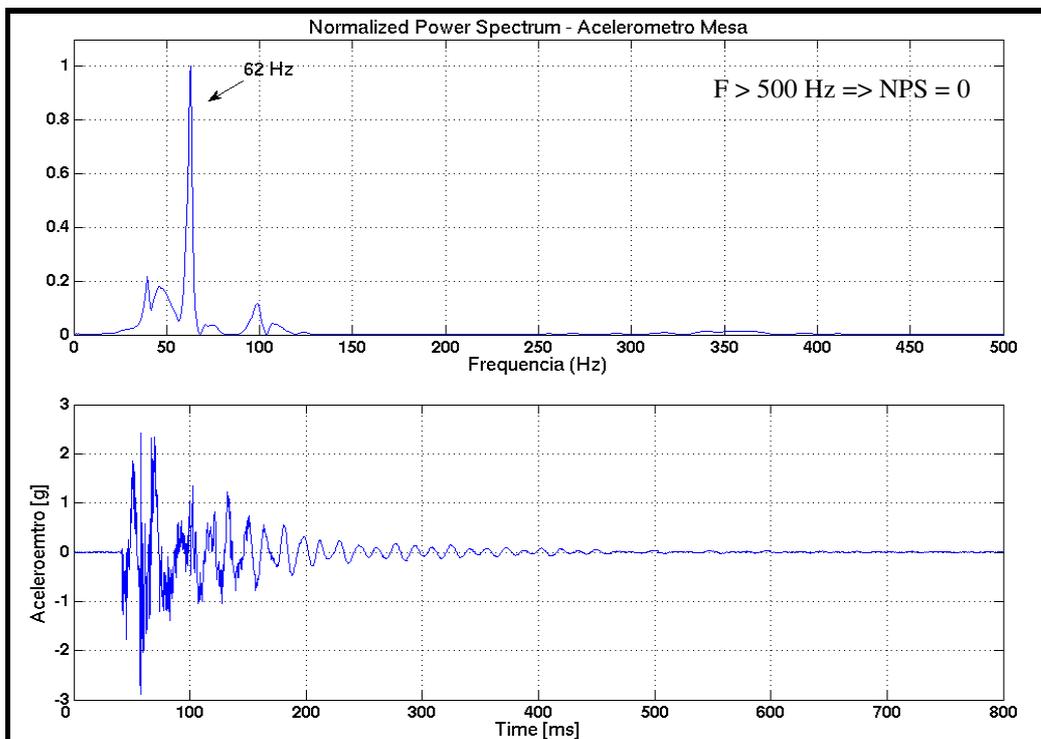


Figura 47 - Sinal e energia do espectro de freqüências do acelerômetro de mesa

Os gráficos das Figuras 48 e 49 mostram o espectro do sinal do extensômetro e do sinal de saída do sensor palito (*Hall*). O primeiro gráfico é resultante da aplicação da *FFT* do sinal da Figura 46 e esta na escala de decibéis (dB) versus frequência (Hz), já o segundo gráfico mostra o sinal do sensor no domínio do tempo e frequência logo após o impacto do palito no disco.

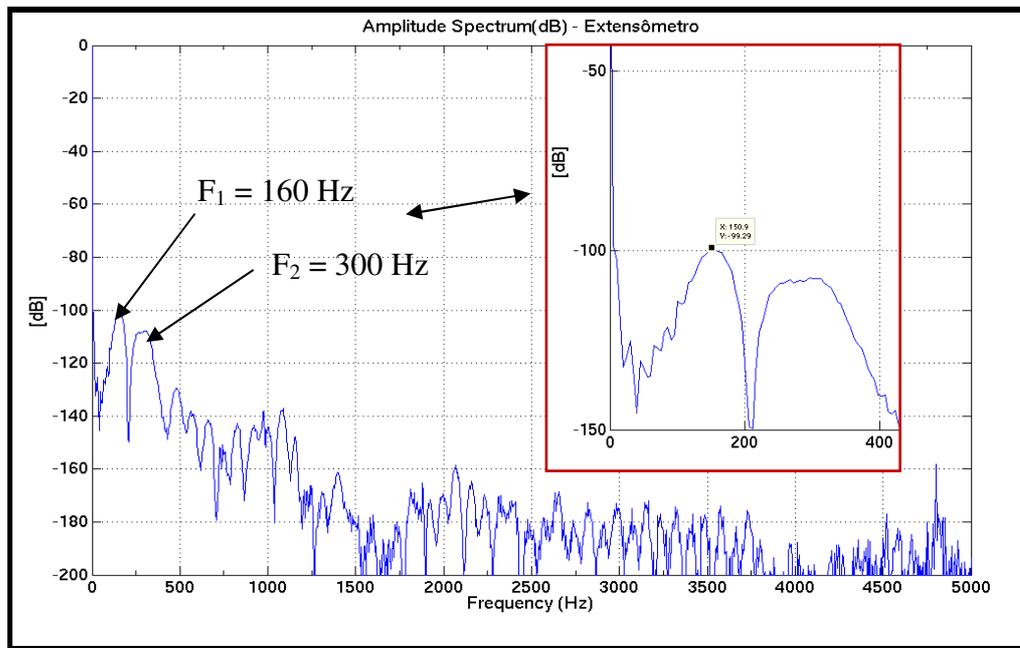


Figura 48 - Espectro de frequências do sinal do extensômetro da Figura 46

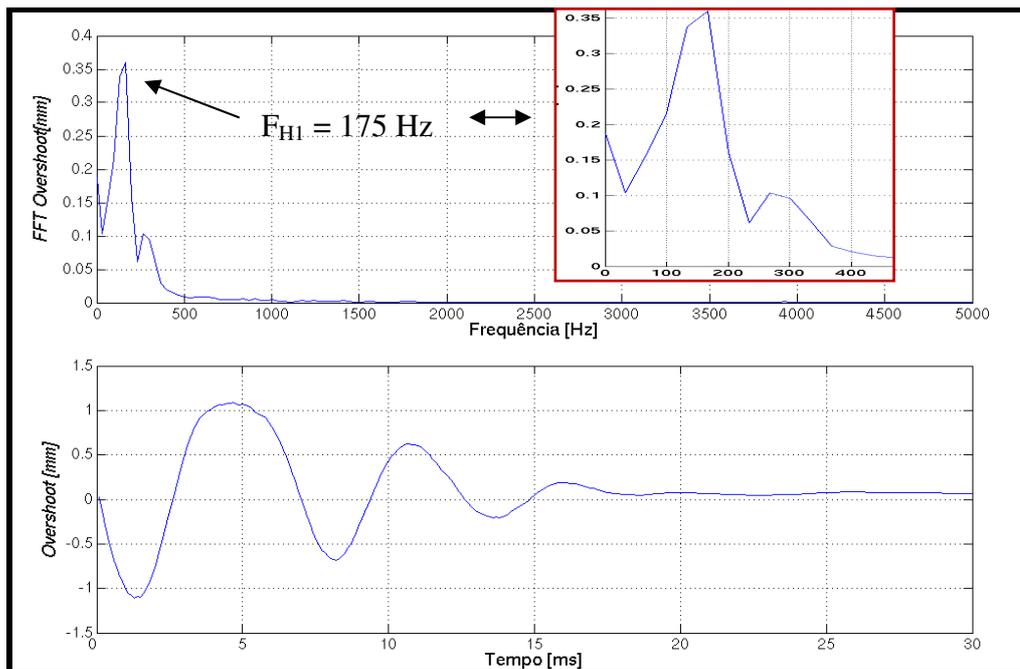


Figura 49 - Oscilação do sinal do sensor palito no domínio da frequência e do tempo

Todos os gráficos são resultados do apalpamento da solda manufaturada no disco giratório na velocidade de 500 mm/s.

Os gráficos abaixo mostram o módulo do sinal do acelerômetro, fixo na haste do palito e seu respectivo espectro de frequência. Resultado da aplicação da *FFT* e normalização, frequência nula de amplitude unitária, do sinal do acelerômetro no domínio do tempo.

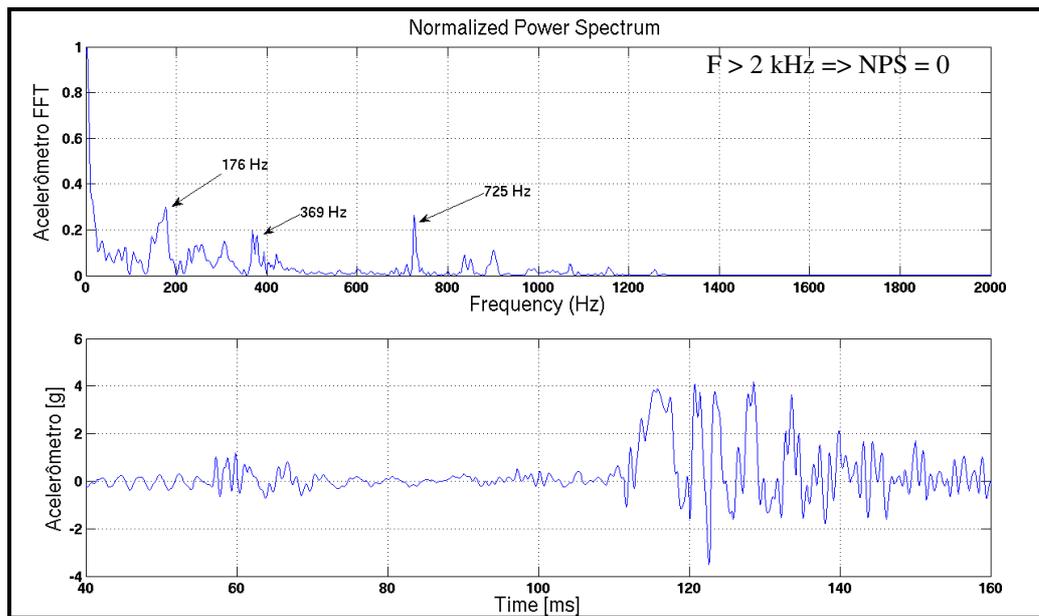


Figura 50 - Espectro e sinal do acelerômetro fixado no palito

Conforme os resultados dos gráficos anteriores, a frequência de ressonância da mesa de 62 Hz não influenciou nas medidas do espectro de frequências dos sinais provenientes dos ensaios de vibração com o sensor palito.

A comparação dos resultados simulados no *software Cosmos* com as medidas experimentais de frequência de vibração foram satisfatórias, pois os valores esperados de frequência estão próximos dos encontrados nas simulações.

O segundo modo de vibração, de 189 Hz, indicado pelo *Cosmos* da simulação com o palito engastado apenas na base foi verificado pelos gráficos de espectro de frequências do transdutor *Hall* e extensômetro (Figura 48 e 49) com os respectivos valores de ressonância medidos em aproximadamente 160 Hz e 175 Hz. O acelerômetro fixo no palito também registrou duas frequências de ressonância em torno de 176 Hz e 765 Hz, verificando também o valor do

segundo e quarto modo de vibração do palito apenas engastado na base pelo *software Cosmos*.

As aproximações dos valores de propriedades mecânicas dos materiais, de condições de contorno e outras simplificações na modelagem numérica por elementos finitos (*software*), que também desconsiderou a presença da mola de fixação da haste com a base do palito, em conjunto com erros de precisão dos dados experimentais influenciaram na comparação entre os resultados práticos e os simulados. Baseado nestas considerações e no erro de médio de 9.87% entre a diferença do valor do segundo modo de vibração simulado e a média dos valores experimentais encontrados pelos transdutores pode-se considerar que os resultados encontrados foram satisfatórios.

A fim de averiguar qualitativamente a influencia do atrito entre as peças do conjunto mecânico do sensor palito (haste, base e mancal), o gráfico abaixo compara os sinais amostrados da mesma solda transversal com três configurações de haste.

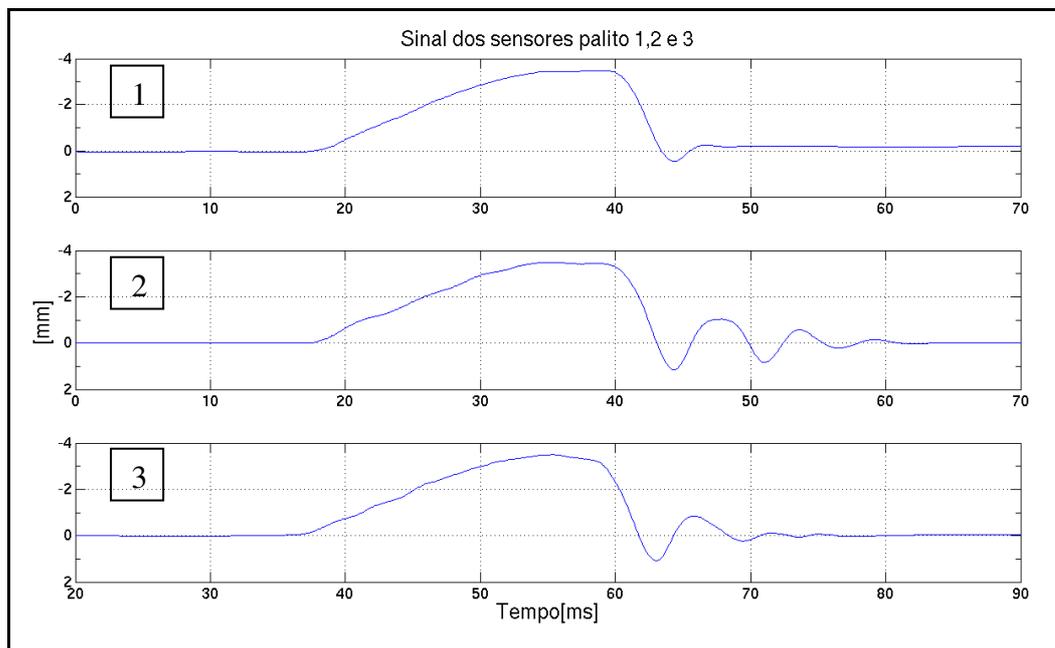


Figura 51 - Sinal dos sensores palito 1, 2 3 perfilando a solda do disco

A Tabela 8 a seguir descreve as medidas de largura das hastes, dos eixos ou mancais e de seus respectivos receptáculos ou fendas na montagem de cada conjunto mecânico do sensor (configuração).

[mm]	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média	$M_x - \text{Média}$
Fenda da Haste (base)	7	7.04	7.03	7.01	7.02	-
Haste do palito 1	7.03	7.02	7.03	7.04	7.03	-0.01
Haste do palito 2	6.97	6.93	6.97	6.94	6.9525	0.0675
Haste do palito 3	6.96	6.95	6.97	6.97	6.9625	0.0575
Mancal do eixo	7.99	7.98	7.98	7.97	7.98	-
Diâmetro Eixo 1	7.98	7.94	7.95	7.95	7.955	0.025
Diâmetro Eixo 2	7.97	7.96	7.97	7.95	7.9625	0.0175
Diâmetro Eixo 3	7.96	7.98	7.98	7.97	7.965	0.015

Tabela 8 - Tabela de folgas entre as hastes e a base do sensor palito

Esta tabela de folgas mostra que a maior folga entre peças foi encontrada na haste do palito dois (0.0675 mm) e a única interferência foi da primeira haste. Isto é coerente com o tempo de transiente do sinal dos sensores palito da Figura 51, pois a maior dissipação da energia no movimento do palito (atrito) estaria entre a haste e a base do sensor (fenda da haste) de maior área de contato.

A Figura 52 e 53 apresenta fotos sequenciais registradas pela câmera de alta velocidade durante ensaios de medição de vibração no disco de prova.

A câmera de alta velocidade estava ajustada para fotografar 2000 fotos por segundo (*fps*), portanto uma foto a cada 500  $\mu$ s. Neste tipo de instrumentação foi preciso usar um "*photo flood*" ou holofote profissional de 500 Watts de potência para gerar o fluxo luminoso necessário para câmera de alta velocidade.

A primeira foto mostra o ponto de descolamento do palito da superfície apalpada. Neste instante é observada uma pequena flexão de sentido oposto à força normal da superfície da solda pelo sinal do extensômetro, que indica a ausência de contato com mesma. Logo em seguida, aparece uma pequena oscilação do sinal do extensômetro indicando uma vibração. A segunda foto, no instante 693.5 ms, apenas registra o ponto de toque no disco após o descolamento do palito da crista da solda.

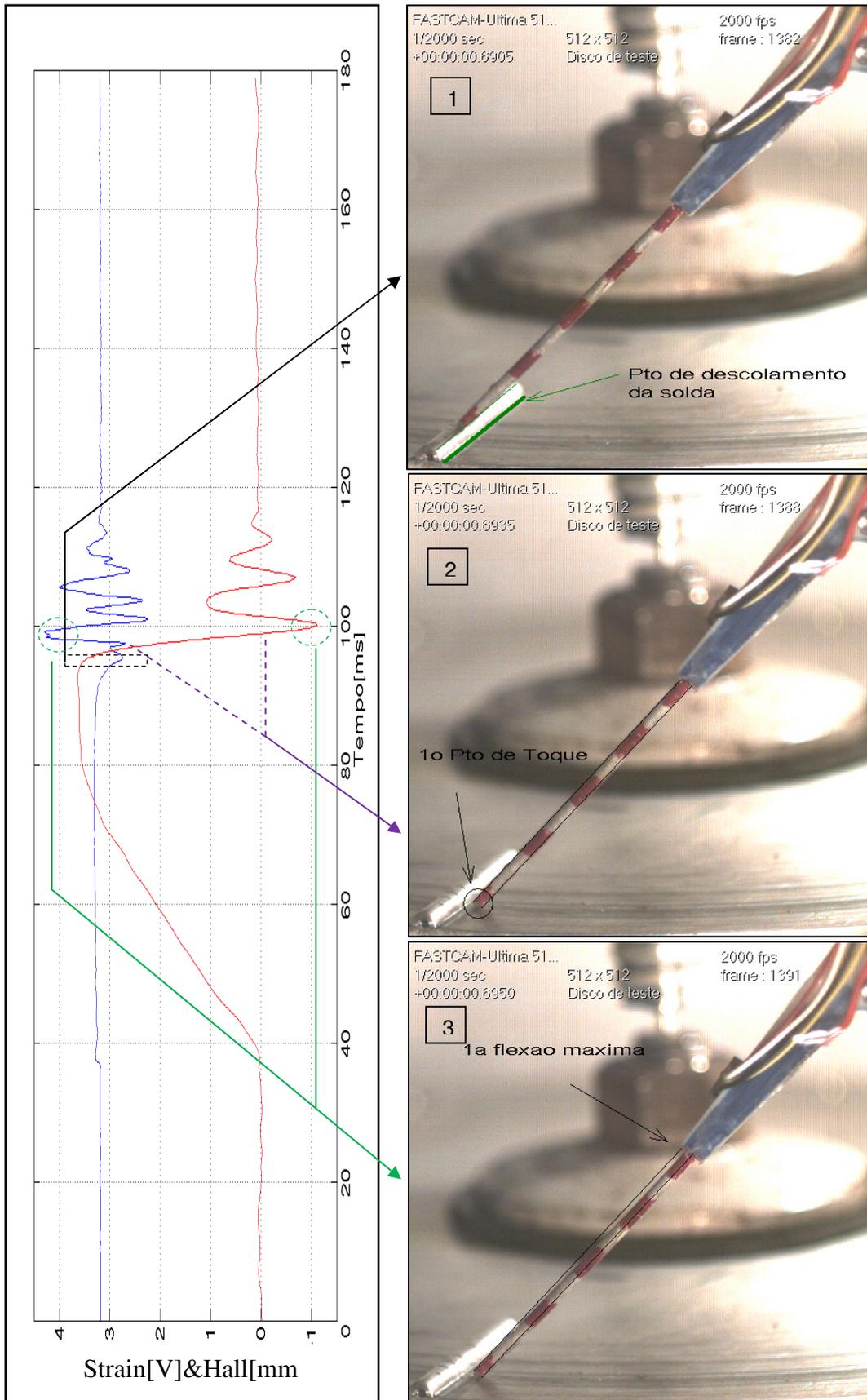


Figura 52 - Sincronismo de fotos da câmera de alta velocidade com vibração do palito

A terceira foto, no instante 695 ms, mostra a primeira flexão do palito. Nesta foto é possível perceber a linha preta de contorno, desenhada em volta do palito relaxado, desalinhada com o palito fletido. O sinal do sensor palito indica erroneamente uma perda de espessura inexistente, pois esta deformação do palito proporciona uma variação angular da haste. A quarta foto, no instante 698.5 ms, mostra o palito no ar após o primeiro impacto com disco. Conforme o sinal do extensômetro, o palito é tensionado no outro sentido e o sensor *Hall* mede um falso ganho de espessura.

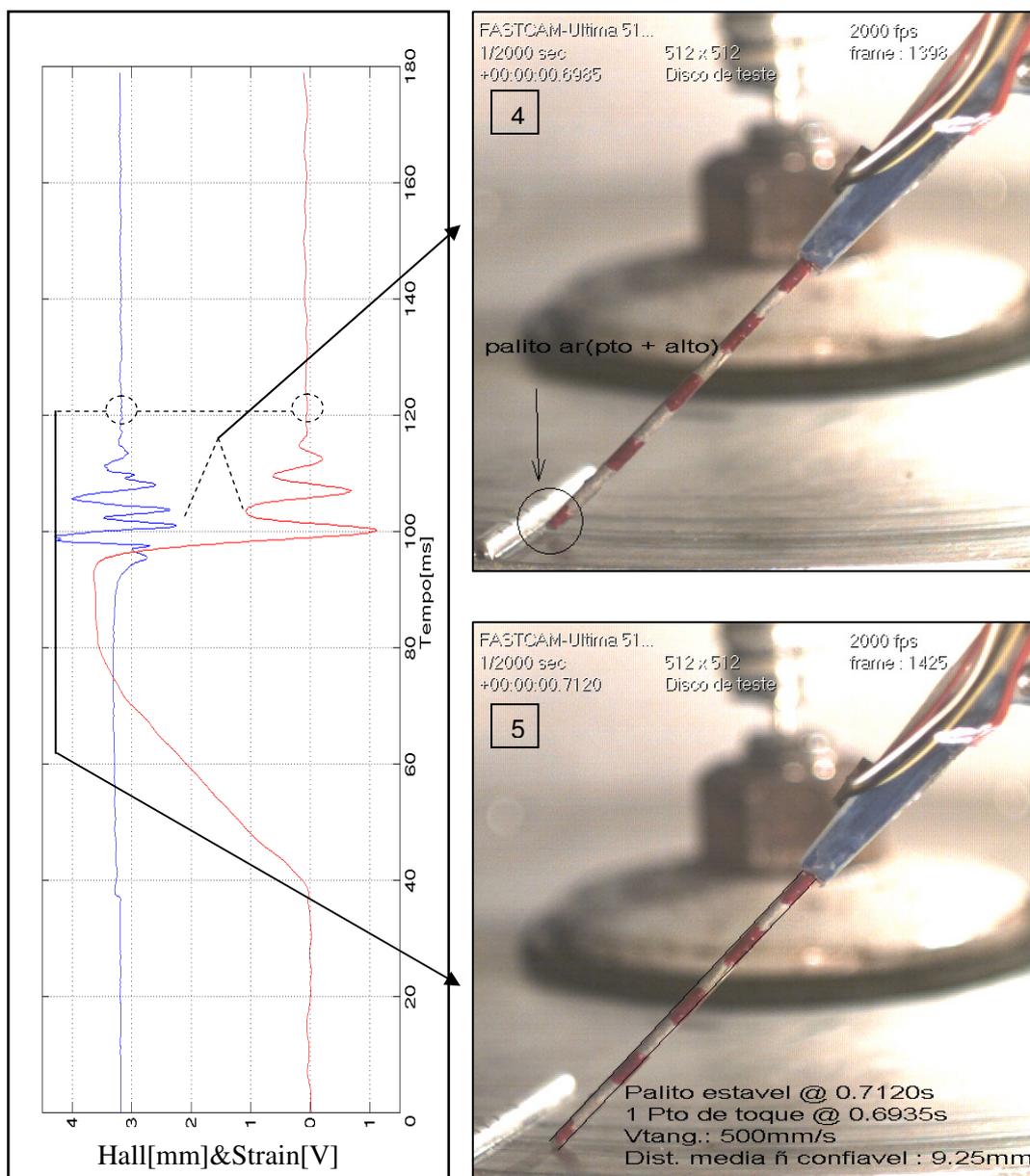


Figura 53 - Sincronismo de fotos da câmera de alta velocidade com vibração do palito (2)

A diferença de tempo entre as duas flexões representa meio comprimento de onda da oscilação e este tempo é 3 ms, portanto um período de 6 ms representa uma frequência de 166,7 Hz. Este resultado é coerente com a análise do espectro de sinais do sensor palito e a simulação do método de elementos finitos no *Cosmos*. Outras oscilações de amplitude menores acontecem até que o atrito das partes móveis do palito retire energia suficiente do movimento harmônico e a medida do sensor se estabilize. Por final registrou-se na quinta foto, em 712 ms, o momento onde não foi percebida nenhuma oscilação no sinal, assim o sinal do sensor *Hall* estabilizou e o palito percorreu 9.25 mm após o primeiro toque depois do descolamento da superfície da solda.

#### 4.1.2

##### **Detecção do efeito de *overshoot* no sensor palito**

Este tópico fornece um possível critério para detecção do efeito de *overshoot* no sinal de saída do sensor palito. Esse critério de detecção está embasado pelos resultados experimentais obtidos no tópico anterior. Além disso, refere-se aos eventos de vibração do sensor palito detectados durante a inspeção de duto.

Esta forma de detecção é baseada na derivada do sinal do sensor palito, ou seja, na localização da oscilação do sinal do sensor em função da razão da amplitude do seu sinal pelo intervalo de distância percorrida ( $dy/dx$ ) pelo mesmo. Isto é, em analogia a um parâmetro eletrônico de amplificadores/*drivers*, comumente caracterizado como “*Slew Rate*” ou taxa de variação máxima da amplitude do sinal saída no tempo. Como *overshoot* acontece após o descolamento da superfície do duto e colide na parede do mesmo, a aplicação deste critério determinaria quando o palito tivesse descolado da superfície do duto, portanto é preciso determinar a taxa de variação da amplitude do sinal do sensor na distância ( $dy/dx$ ) ou deslocamento do pig (odômetro).

O gráfico da Figura 54 mostra o sinal do sensor e sua derivada no espaço, onde a amplitude máxima de oscilação do sinal acontece quando a derivada ( $dy/dx$ ) assume o valor de 1.05.

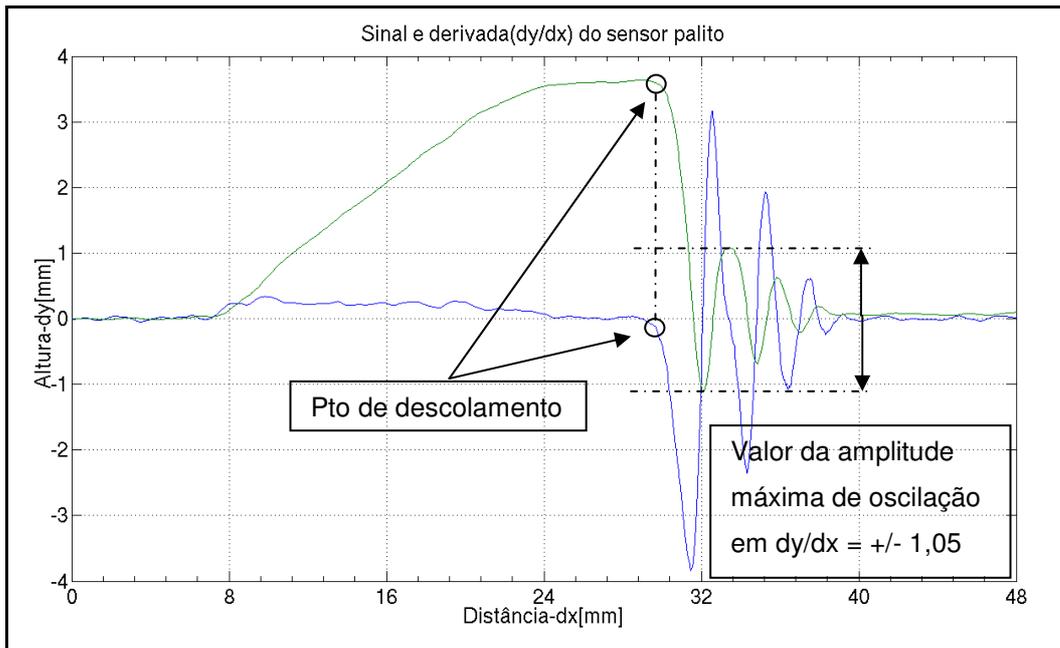


Figura 54 - Sinal (verde) e derivada do sinal do sensor (azul) na perfilagem da solda manufaturada.

Como a frequência de aquisição da eletrônica embarcada é 512 Hz, pelo teorema da amostragem de Nyquist, o sistema embarcado de aquisição de dados pode captar sinais de até 266 Hz, portanto é possível detectar a primeira frequência de ressonância (~167 Hz) do sensor palito na inspeção. Na figura abaixo, com três níveis de zoom, é possível verificar o *overshoot* do sinal do sensor palito ao apalpar uma solda transversal no duto durante a inspeção.

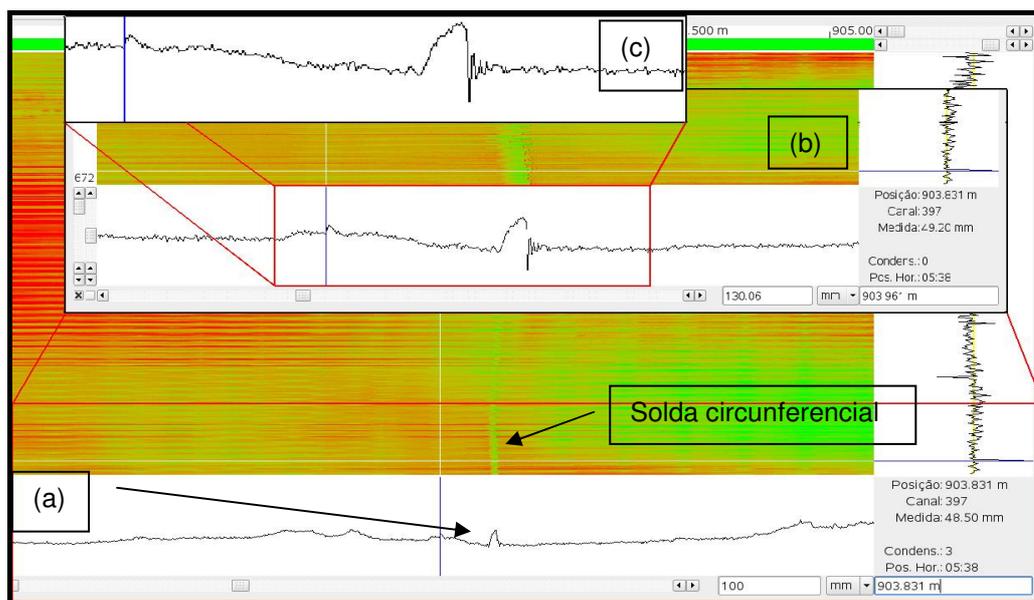


Figura 55 - Trecho de inspeção com *overshoot* (a). (b) zoom de (a), (c) zoom de (b).

Na aplicação deste critério aos dados de uma inspeção real e adotando uma taxa do sinal ( $dy/dx$ ) maior que 1.05 para localização de oscilações em trechos de inspeção obteve-se os eventos listados no histograma abaixo.

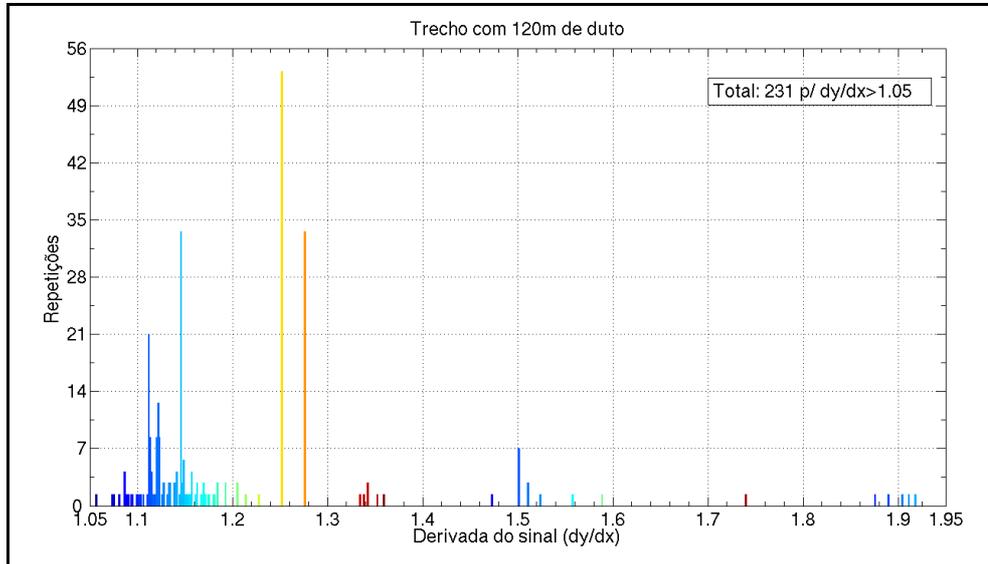


Figura 56 - Histograma da taxa do sinal ( $dy/dx$ ) do sensor

Este histograma representa um trecho de duto com 120 metros de extensão, ou seja, o trecho possui 10 soldas transversais (10 tubos). Neste trecho foram detectados 231 eventos com  $dy/dx > 1.05$ . Sabendo que o gráfico corresponde à análise de 220 sensores palito, isto significa que 10% das medidas de cada sensor palito apresentaram *overshoot* no sinal. Embora, os 231 eventos registrados no histograma não tenham sido todos verificados, os canais escolhidos ao acaso apresentaram o sinal característico do *overshoot* no ponto detectado pelo critério.

## 4.2

### Pré-conceitual para nova versão de sensor palito

Os palitos apalpadores são os elementos principais do Pig Palito para medição de micro-geometrias da parede interna do duto. De acordo com as experiências e resultados anteriores o desenvolvimento de uma segunda versão do

sensor palito foi baseado na superação das deficiências do sensor antigo. Nesta versão a proposta de solução seria construir palitos de pequena dimensão, ou seja, com pequeno raio de rotação para oferecer uma cinemática adequada do conjunto haste e ponteira, e atingir o fundo de uma cratera abrupta (defeito). A redução da massa do sensor também favoreceria na dinâmica do movimento do palito (haste mais ponteira) até o fundo da cratera, enquanto o pig se desloca dentro do duto, portanto a inércia rotativa do palito seria reduzida. Os fatores relatados acima podem ser subentendidos pelos resultados anteriormente expostos nos tópicos anteriores.

### 4.3

#### Resultados de inspeções de campo do Pig Palito

Neste tópico serão apresentados alguns resultados encontrados em inspeções de campo com Pigs Palito realizadas pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias de Inspeção (CPTI) da PUC-Rio e Petrobras. A idéia deste tópico é mostrar do que a medição micro-geométrica do sensor palito é capaz de produzir. Até hoje os Pigs Palito inspecionaram dutos com velocidades de escoamento de fluido entre 0.5 m/s e 2 m/s, entretanto não é esperado que aconteça nenhum problema com o equipamento para velocidades entre 2 m/s e 4 m/s, exceto degradação da qualidade de medida (dinâmica do sensor apalpador).

Atualmente mais de 500 km de inspeções foram realizadas com o Pig Palito em dutos *offshore* e *onshore*, seja em campos de produção ou em sistemas de distribuição de petróleo terrestre.

#### 4.3.1

##### Pig Cobra Palito

O Pig Cobra Palito é um tipo de pig instrumentado flexível que usa a tecnologia de micro-geometria de apalpamento como o Pig Palito convencional. O

diferencial é a fixação dos sensores palito numa estrutura de poliuretano flexível, que permite inspecionar dutos com altas restrições geométricas para a passagem de pigs instrumentados convencionais. Estes dutos muitas vezes são considerados "não-pigaveis" [3]. Sua característica flexível aliada ao seu baixo peso proporciona facilidades nas manobras de lançamento e recebimento. O primeiro protótipo do Pig Cobra Palito foi projetado para operar em dutos com oito polegadas de diâmetro. A foto abaixo mostra o Pig Cobra Palito equipado com 144 sensores palito distribuído por 12 coroas instrumentadas, que leva a uma resolução circunferencial de 4.5 milímetros.

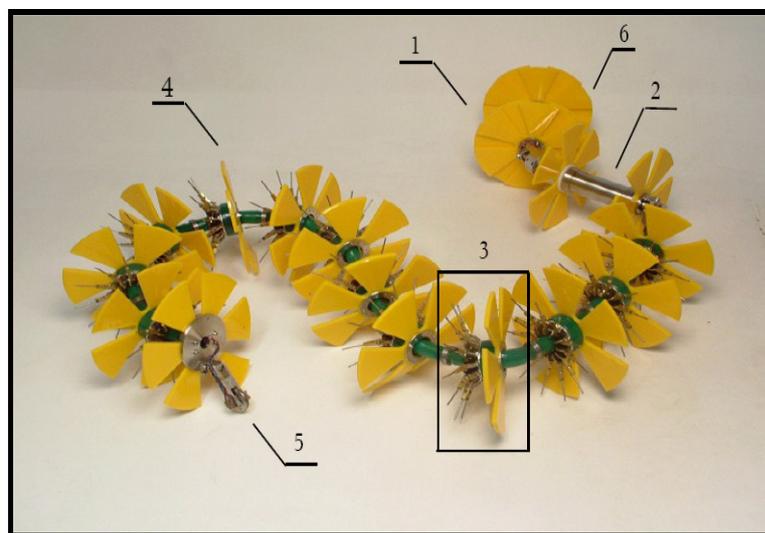


Figura 57 - Pig Cobra Palito (1) Vaso de bateria, (2) Vaso de eletrônica, (3) Coroa instrumentada, (4 e 6) Copos de sustentação e tração, (5) Hôdometro.

Em julho de 2006 uma inspeção pioneira com Pig Cobra Palito foi realizada na Bacia de Campos e teve como objetivo verificar a presença de corrosão interna do trecho rígido de um oleoduto misto, que interliga duas plataformas. Define-se duto misto o duto composto por trechos de linhas flexíveis e trechos de duto rígido de aço. A inspeção desta linha implicava na passagem em curvas com raios de curvatura acentuados, da ordem de 1.5 vezes o diâmetro do duto (1.5D), e tubulações com duplo diâmetro de 8 e 10 polegadas. Além destas características geométricas, uma válvula não estava totalmente aberta no fundo do mar e representava mais um desafio para passagem de pigs instrumentados [6, 7].



Figura 58 - Pig Cobra Palito no canhão do recebedor

Uma análise detalhada revelou a inexistência de perdas de espessura interna no duto. Alguns dados indiretos mostraram que a ferramenta funcionou corretamente:

- Nos trechos de duto flexível, os sensores perfilaram corretamente a estrutura helicoidal da camada interna de aço inox, denominada camada “*flexbody layer*” pelo fabricante.
- Todas as soldas circunferenciais foram identificadas e quando requerido quantificadas.
- Procurando eliminar as possibilidades de corrosão uniforme em todo o perímetro, realizou-se a medida do diâmetro do duto em vários pontos. Em todos os casos, o diâmetro medido ficou próximo do nominal.

Nas Figuras 59 e 60 estão destacadas algumas ocorrências da inspeção.

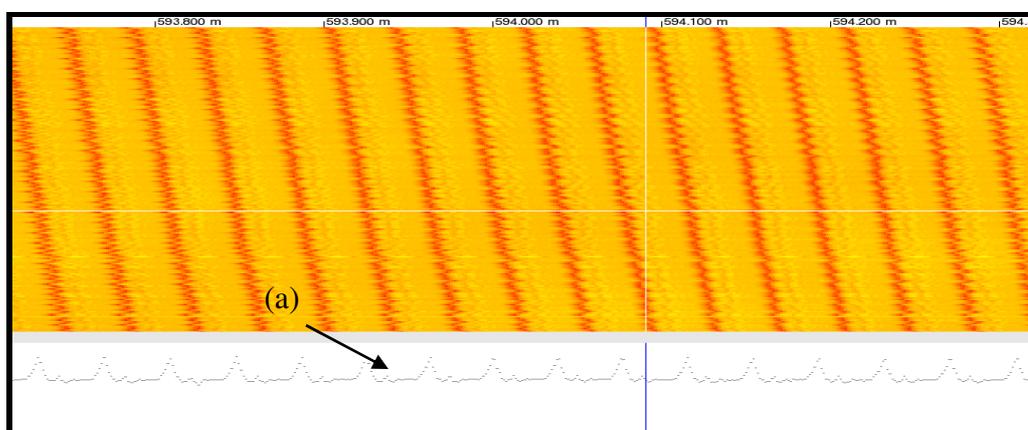


Figura 59 - Superfície interna da parede do *Riser* (“*flexbody layer*”) - (a) corte longitudinal

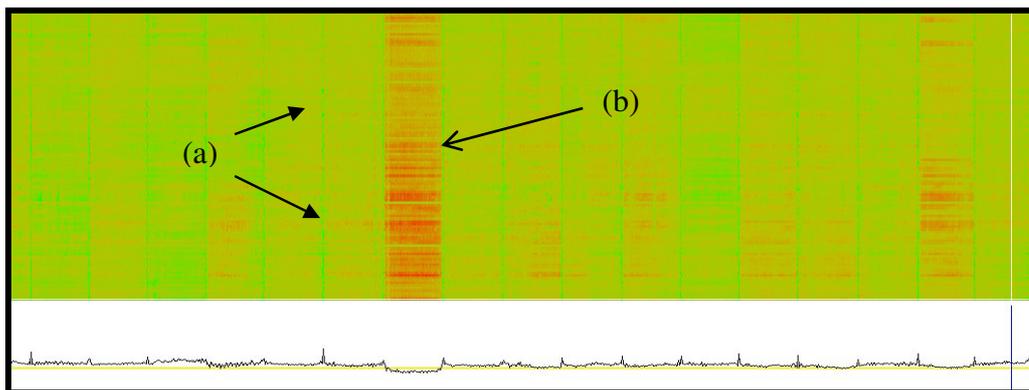


Figura 60 - Soldas circunferenciais (a) e tubo com diâmetro maior (b) no duto

### 4.3.2

#### Pigs Palito Convencionais

O primeiro resultado foi obtido com o Pig Palito de 22 polegadas, que inspecionou 16 km de duto na Bacia de Campos, RJ. Este pig era constituído por único módulo com 250 sensores palito e resolução radial de 7 mm. A foto abaixo mostra o equipamento na bancada.



Figura 61 - Pig Palito de 22 pol.

Os resultados coletados por este equipamento foram comparados aos dados de uma inspeção anterior realizada com Pig Ultra-Sônico convencional neste duto. A correlação obtida entre os dados coletados nas duas inspeções

mostraram o dimensionamento de defeitos em termos de profundidade e comprimento muito semelhantes. O gráfico comparativo das profundidades detectadas pelos dois equipamentos é apresentado na figura abaixo [5].

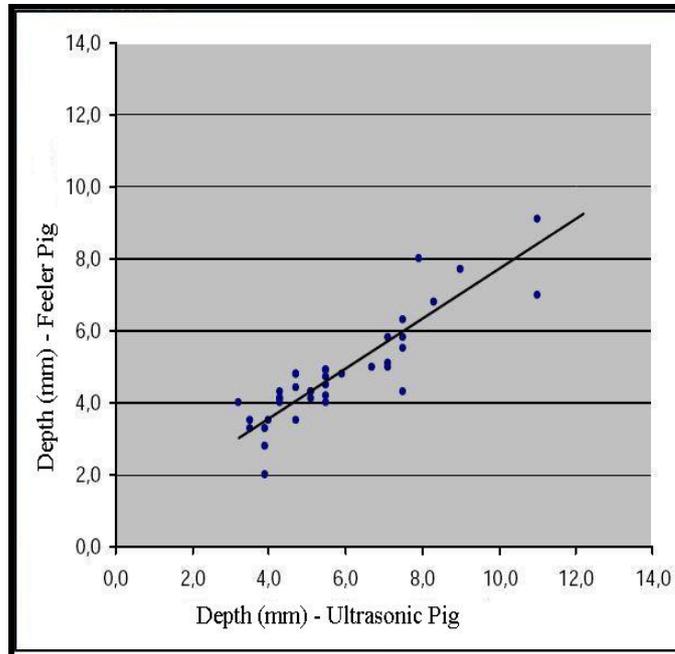


Figura 62 - Gráfico comparativo de dados entre o Pig Ultra-Sônico e Palito

Estes dados indicaram a viabilidade técnica desse novo tipo de pig instrumentado, assim como o sistema de visualização, aquisição e medição de perda de espessura em dutos pela tecnologia do Pig Palito [5]. Nas Figuras 63 e 64 são apresentadas imagens do *software* de visualização do Pig Ultra-Sônico convencional versus Pig Palito. Nota-se a similaridade das imagens na detecção de uma área com corrosão interna no duto [7].

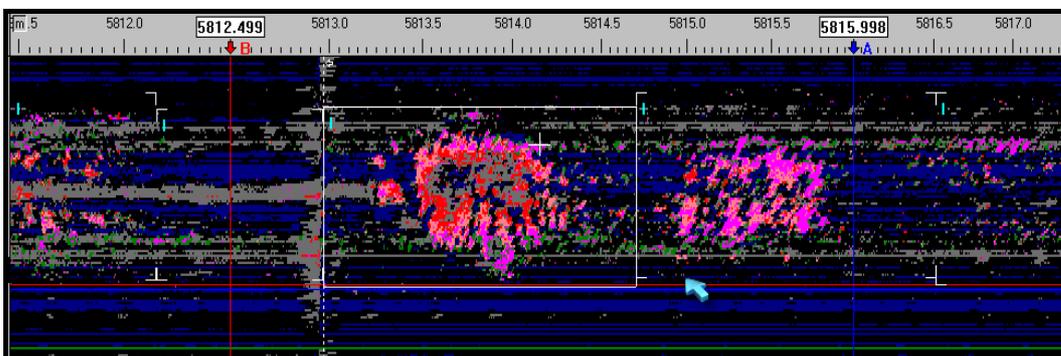


Figura 63 - Imagem de corrosão interna detectada no duto pelo Pig Ultra-Sônico

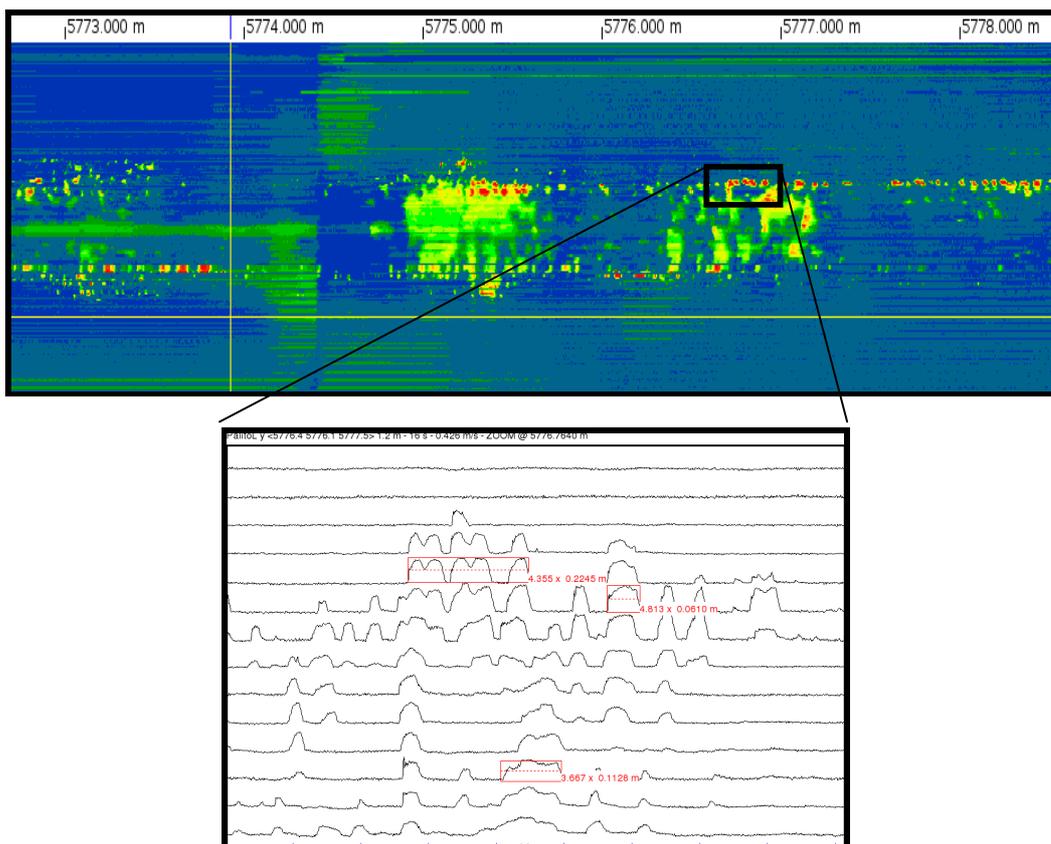


Figura 64 - Corrosão interna detectada pelo Pig Palito de 22 pol. e pedaço ampliado da imagem em gráfico de linhas.

O Pig Palito de 24 polegadas inspecionou um oleoduto de 60 km da Petrobras, situado em Guararé, RN. A ferramenta tinha 300 sensores palito distribuídos em cinco coroas instrumentadas. O oleoduto apresentava indícios de corrosão interna generalizada na sua geratriz inferior devido à produção demasiada de água junto ao petróleo.

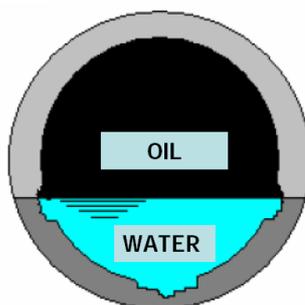


Figura 65 - "Channeling Corrosion" causada por alta produção de água junto ao óleo

Este tipo de corrosão uniforme no duto, apresentada na figura anterior, é mais comumente conhecida como “*channeling corrosion*”.

A operação de lançamento e recebimento de Pigs Palito maiores que 10 polegadas é feita com auxílio de guindastes por causa do peso elevado. Por isso um tubo ou calha de transporte é utilizado como proteção dos sensores palito na inserção e remoção do equipamento de dentro do canhão.



Figura 66 - Lançamento do Pig Palito de 24 pol.



Figura 67 - Pig Palito de 24 pol. no receptor

Conforme esperado, na análise de dados foi verificada a presença de corrosão uniforme na geratriz inferior do duto. A inspeção foi analisada pela PipeWay, contratada pela Petrobras, para efetuar a análise dos sinais registrados pelo Pig Palito devido à quantidade enorme de anomalias encontradas no duto. A análise foi feita de forma automática com as ferramentas de software

desenvolvidas pela PipeWay. Em um trecho de 12 km foram identificadas mais de 750 mil ocorrências de perda de metal, com até 70% de perda de espessura. Abaixo estão figuras de trechos do duto com “*channeling corrosion*” e depósitos.

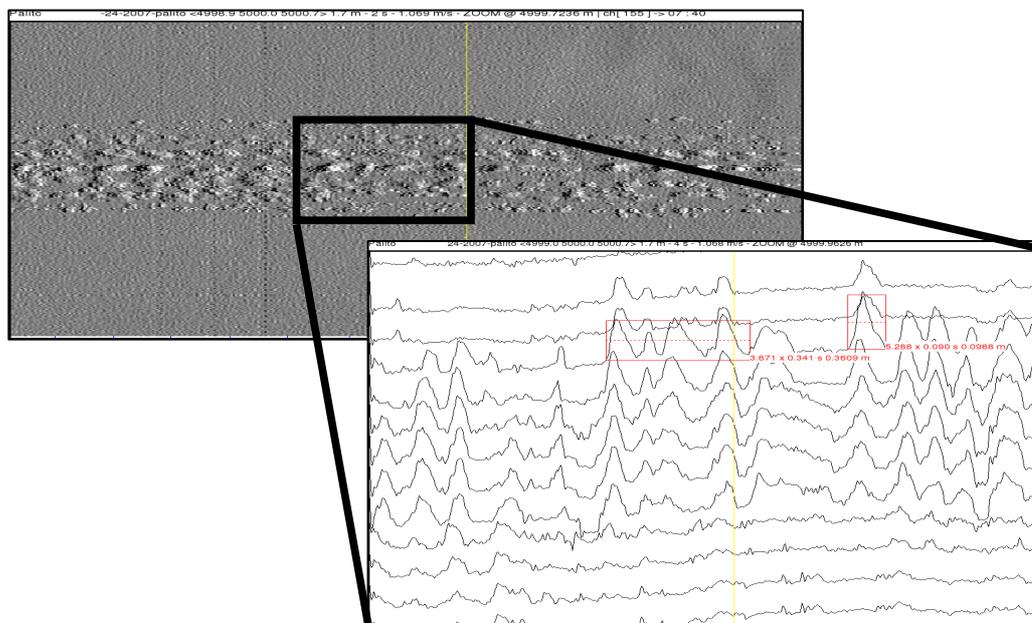


Figura 68 - “*Channeling corrosion*” mais gráfico de linhas do pedaço selecionado

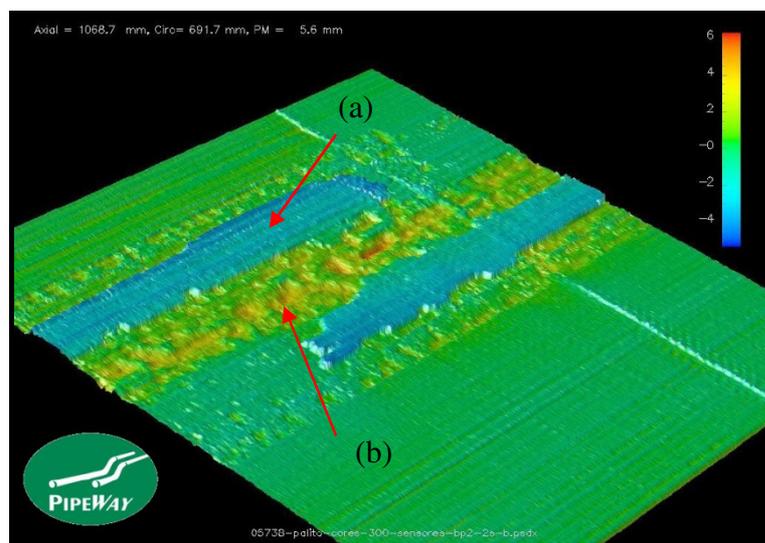


Figura 69 - Visão da superfície do duto com depósitos (a) e corrosão uniforme (b) detectada pelo software da Pipeway.

Os resultados com Pig Palito não se limitam apenas à detecção de corrosão interna, por ser um pig geométrico de alta resolução ele serve também para verificar a qualidade das soldas, equipamentos instalados na linha, mossas, amassamentos, dentes e mudanças de diâmetro ao longo do duto. Na Figura 70 é mostrado um desbaste comumente realizado quando os tubos são soldados para compor o duto. Assim pode-se avaliar a qualidade das instalações de dutos [7].

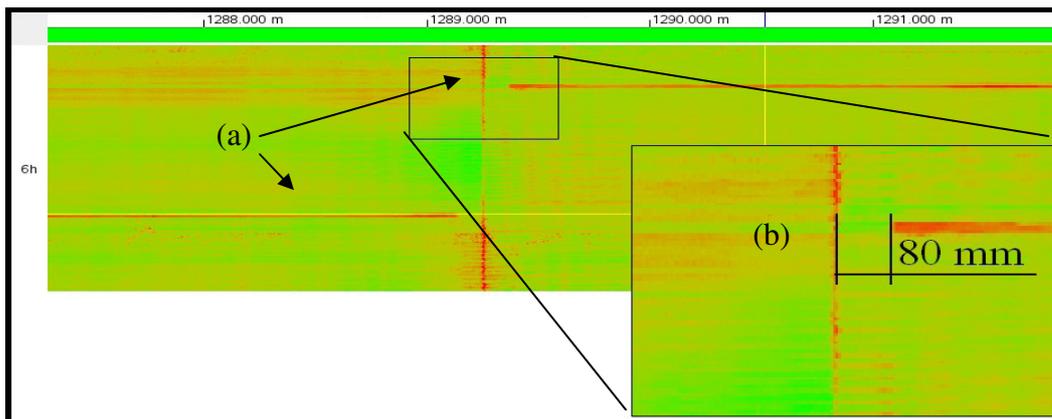


Figura 70 - Visão da superfície interna do duto sem corrosão, com soldas circunferencial e longitudinal (a) e região de desbaste de solda (b).

Além de detectar defeitos, a ferramenta tem capacidade de avaliar a qualidade de limpeza do duto, detectando e dimensionando depósitos de detritos no interior do mesmo. Abaixo, na Figura 71, é apresentado um resultado de inspeção que demonstra a capacidade do Pig Palito em detectar depósitos.

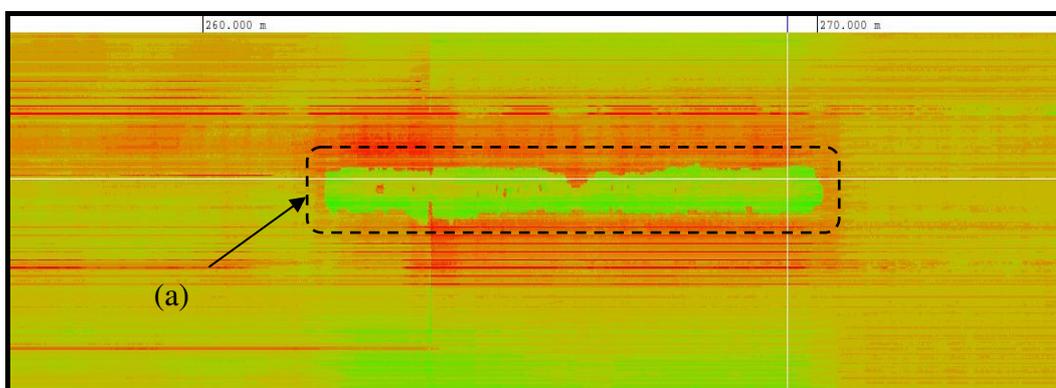


Figura 71 - Depósito (a) encontrado em duto (imagem do *software*)